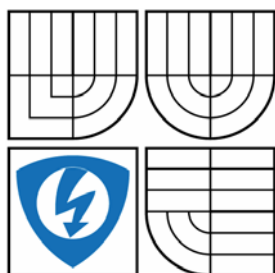


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ŘÍDICÍ A SENZORICKÝ SYSTÉM MALÉHO PRŮZKUMNÉHO MOBILNÍHO ROBOTU

CONTROL SYSTEM OF SMALL MOBILE ROBOT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JIŘÍ RYSNAR

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. LUDĚK ŽALUD, Ph.D.

BRNO 2011



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Jiří Rysnar

ID: 98203

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Řídicí a senzorický systém malého průzkumného mobilního robotu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte řídicí systém pro předložený kolový mobilní robot. Robot bude použit pro testování parametrů komunikačních modulů a operátorské dálkové řízení s minimálním datovým tokem. Vyberte vhodné snímače pro umístění na tento robot a připojte je k řídicímu systému. Řídicí a senzorický systém otestujte podle pokynů vedoucího práce.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Joseph J. Jones, et. al., Mobile Robots - Inspiration to Implementation, A K Peters, 1999, ISBN 1-56881-097-0

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 23.5.2011

Vedoucí práce: doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá řízením podvozku mobilního kolového robotu a jeho senzorickým systémem. Snímače poskytují informace o vzdálenosti překážek v jeho okolí a jeho orientaci v prostoru. Komunikace s robotem je realizována radiomodemy, povely pro robota a data ze snímačů jsou posílány po sériové lince mezi PC a mikrokontrolérem.

KLÍČOVÁ SLOVA

mobilní robot, ultrazvukový dálkoměr, kompas, servomotor, mikrokontrolér

ABSTRACT

This master's thesis elaborates on the control of a wheeled mobile robot and its sensor system. The sensors provide information about distances of obstacles in its surroundings and orientation in area. The communication is realized by radiomodems, commands and data are sent by serial link between microncontroller and the PC.

KEYWORDS

mobile robot, ultrasonic range finder, servomotor, microcontroller

Bibliografická citace:

RYSNAR, J. *Řídicí a senzorický systém malého průzkumného mobilního robotu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 70s. Vedoucí diplomové práce byl doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Řídicí systém malého průzkumného mobilního robotu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 22. května 2011

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Lud'ku Žaludovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 22. května 2011

.....
podpis autora

OBSAH

Obsah	8
1 Úvod.....	10
2 Podvozek.....	11
2.1 Podvozek Traxxas	11
3 Snímače.....	13
3.1 SRF10 – ultrazvukový dálkoměr	13
3.1.1 Popis SRF10	13
3.1.2 Technické údaje.....	13
3.1.3 Registry.....	14
3.1.4 Měření.....	14
3.1.5 Adresace	16
3.2 Modul kompasu CMPS03	16
3.2.1 Informace o azimutu – I2C.....	17
3.2.2 Informace o azimutu – PWM	17
3.2.3 Kalibrace kompasu	17
3.2.4 Zapojení a Rozměry	18
3.3 Modul tříosého akcelerometru ACC7260	19
4 Mikrokontrolér Atmel mega 8	20
4.1 Popis	20
4.2 Čítače a časovače.....	20
4.3 Sběrnice TWI.....	21
4.3.1 Popis funkce	22
4.3.2 TWI modul	24
4.4 I/O porty	25
4.5 AD převodník	26
4.6 AVR Studio 4	27
4.7 Programátor	28
5 Komunikační moduly	29
5.1 RS232	29
5.2 Wood&Douglass RSX150.....	30
5.3 Racom RE400.....	31
5.4 OEMSPA310.....	32
6 Realizace.....	33
6.1 Program pro řízení podvozku - ATMEGA8.....	33
6.1.1 Řízení podvozku.....	33
6.1.2 Ultrazvukový dálkoměr	35
6.1.3 Kompas CMPS03	37
6.1.4 Akcelerometr ACC7260	37
6.1.5 Stručný popis zdrojového kódu pro ATmega8.....	38
6.2 Ovládací program Builder 2007	40
6.2.1 Stručný popis zdrojového kódu uživatelského programu	42
6.3 Měření charakteristik snímačů	44
6.3.1 Charakteristika ultrazvukového dálkoměru SRF10.....	44
6.3.2 Charakteristika magnetometru CMPS03	50
6.3.3 Charakteristika akcelerometru ACC7260.....	54

6.4	Návrh rozmístění snímačů SRF10	56
6.5	Podvozek	56
6.6	Elektrické zapojení	59
6.6.1	Zjednodušené schéma zapojení řídicí desky a komponentů.....	59
6.6.2	Schéma zapojení podvozku robota.....	59
6.6.3	Schéma zapojení plošného spoje	60
6.7	Testování komunikačních modulů	64
7	Závěr	66
8	Seznam literatury	67
9	Seznam obrázků.....	68
10	Seznam tabulek	70

1 ÚVOD

Předmětem této diplomové práce je návrh a realizace řízení malého mobilního kolového robotu. Pro zdolávání různých překážek má robot podvozek Traxxas s náhonem všech čtyř kol, diferenciálem a vysokým odpružením. Pohyb kolového robotu je řízený regulátorem otáček pro stejnosměrné motory. Natáčení předních kol je řízeno servomotorem.

Důležitou částí je volba a umístění snímačů pro orientaci v prostoru, tedy měření vzdálenosti různých překážek, směr natočení robota a jeho náklon. Ověření charakteristik zvolených snímačů.

Řízení robota je realizováno mikrokontrolérem typu Atmel AVR. Mikrokontrolér obsluhuje podvozek, měření na snímačích a komunikaci s PC. Komunikace robota s PC je realizována po sériové lince bezdrátovými komunikačními moduly.

Pro snadnou orientaci operátora je vytvořen uživatelský program, který graficky a číselně podává informace naměřenými snímači a může upravovat jejich parametry. Mobilní robot je určený pro testování komunikačních modulů, vytvořený program provádí měření síly signálu.

2 PODVOZEK

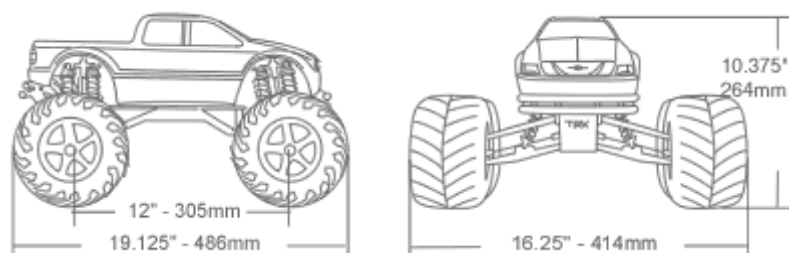
2.1 Podvozek Traxxas

Firma Traxxas vyrábí RC modely aut. Pro mobilního robota byl tento podvozek zvolen pro jeho kvalitu zpracování a výkony.

Parametry podvozku jsou zapsány v tabulce č.1. Podvozek je osazen tlumiči, náhonem 4x4 s diferenciály, které jsou poháněny přes kardanové hřídele.

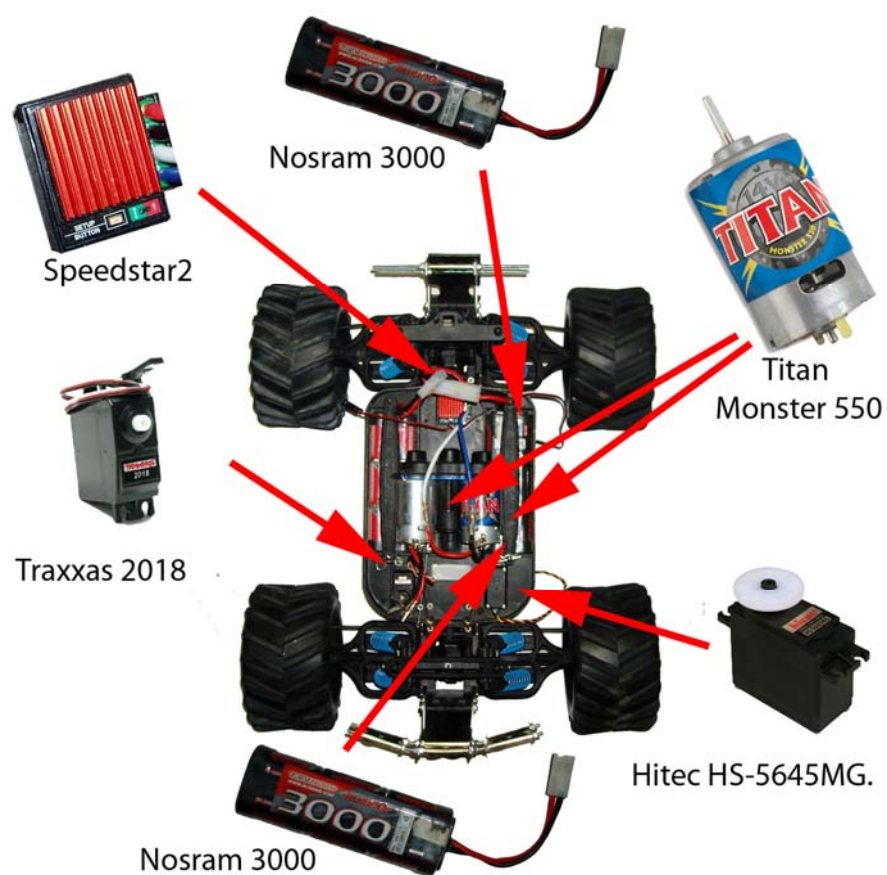
Parametr	Hodnota
Délka	486mm
Šířka	414mm
rozvor	305mm
Světlá výška uprostřed podvozku	101mm
Váha	4,4kg

Tabulka 1 – Parametry podvozku

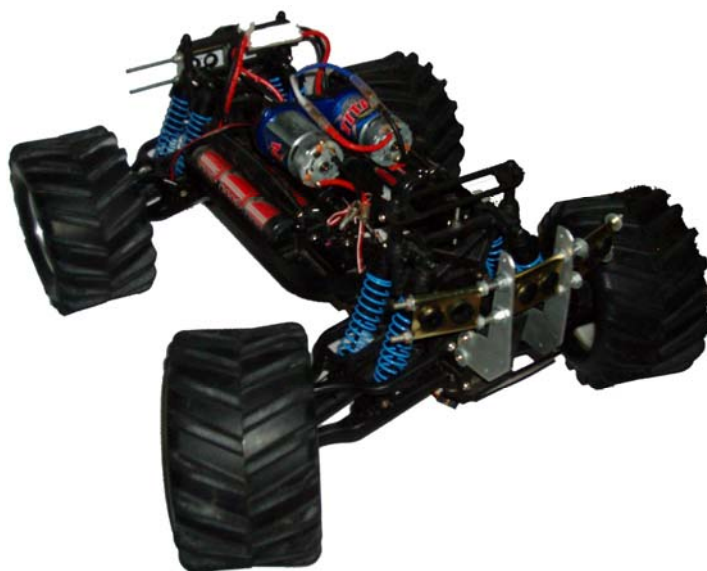


Obrázek 1 – Rozměry modelu auta

Pohon automobilu je řízen dvěma stejnosměrnými motory Titan Monster 550 (14,4V, chlazené ventilátorem) a přídatnou dvoustupňovou převodovkou. Motory jsou řízeny regulátorem Speedstar2. Řazení rychlostních stupňů je ovládané servomotorem Traxxas 2018. Natáčení kol zajišťuje servomotor Hitec HS-5645MG. Řízení servomotoru se provádí šířkou pulzu PWM. Napájení dodává NiMH baterie Nosram 3000 (napětí 7,2V).



Obrázek 2 – Rozmístění komponentů na podvozku Traxxas



Obrázek 3 – Podvozek Traxxas

3 SNÍMAČE

3.1 SRF10 – ultrazvukový dálkoměr

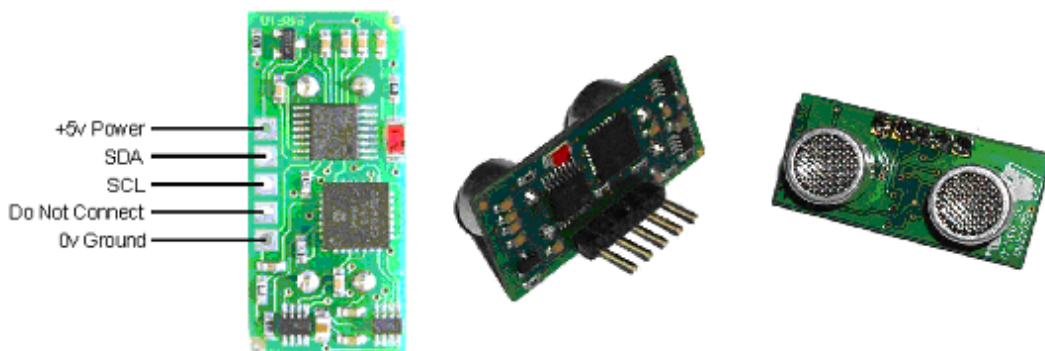
3.1.1 Popis SRF10

SRF10 je často využíván v mobilní robotice pro detekci blízkých překážek. Ultrazvukový dálkoměr komunikuje pomocí sběrnice I2C. Je vyroben s adresou 0xE0. Ultrazvukový dálkoměr může být naprogramován na adresy 0xE0 až 0xFE a umožňuje tím použití až šestnácti dálkoměrů v jednom systému. Omezujícím faktorem je délka cyklu měření, protože každý snímač musí měřit samostatně, aby nedocházelo k falešným odrazům signálů, které by mohly být vyslány od jiného dálkoměru.

Maximální dosah je až 6 metrů. Změnou hodnoty rozsahu v registru lze využít při potřebě menší citlivosti na předměty mimo osu snímače,

3.1.2 Technické údaje

Konektor obsahuje pět pinů (napájení 5V, napájení 0V, datové signály SDA a SCL, a volný pin využitý pouze při výrobě a v dalším zapojení je nevyužit. Signály SCL a SDA musí být připojeny přes pull-up rezistory k napětí 5V. Snímač SRF10 je vždy zařízení typu Slave. Na dálkoměru je červená LED dioda, která po připojení napájení signalizuje blikáním nastavenou adresu na I2C sběrnici (je přerušeno při přijmutí jakéhokoliv příkazu) a také krátce blikne při každém vyslání měřicího signálu.



Obrázek 4 – Připojení ultrazvukového dálkoměru SRF10 [3]

3.1.3 Registry

SRF10 zahrnuje 4 registry, z nichž lze zapisovat do 1,2,3. Registr 0 slouží pro zahájení měření. Doba měření je nastavena na 65ms, tato hodnota může být změněna (určuje ji zvolený rozsah měření). Dálkoměr nereaguje na příkazy na I2C sběrnici během měření. Výsledek měření je zapisován do registru 2 a 3, v jednotkách cm, inch nebo μ s (mikrosekunda).

Adresa registru	Čtení	Zápis
0	Verze software	Příkazový registr
1	Nepoužit (čte 0x80)	Maximální zesílení (nastaveno 16)
2	Vzdálenost vyšší byte	Rozsah měření (nastaveno 255)
3	Vzdálenost nižší byte	Nepoužit

Tabulka 2 – SRF10 registry [3]

3.1.4 Měření

Měření se zahájí zápisem do příkazového registru. Po dokončení měření lze přečíst výsledek. Měření je dokončeno podle nastavení rozsahu a maximálního analogového zesílení (přednastaveno na 65ms). Protože dálkoměr nereaguje na příkazy během měření (je čtena hodnota 0xFF), můžeme porovnávat a pozorovat přijaté hodnoty s hodnotou 0xFF a tím rozeznat konec měření.

Maximální rozsah měření je určen vlastním časovačem SRF10 s přednastavenou hodnotou 65ms, ekvivalentní 11 metrům. Rozsah dálkoměru je však 6 metrů. Rozsah lze měnit zápisem do registru 2. Nastavený rozsah je dán výrazem (Registr2+1)*43mm. Změna rozsahu se provádí, pokud je nutné měření zrychlit nebo spouštět měření rychleji za sebou. Zvyšuje se však riziko příjmu odrazu z předchozího měření. Proto musí být sníženo i maximální zesílení.

Příkaz		Činnost
Desítkově	Šestnáctkově	
80	0x50	Start měření - výsledek v palcích
81	0x51	Start měření - výsledek v centimetrech
82	0x52	Start měření - výsledek v mikrosekundách

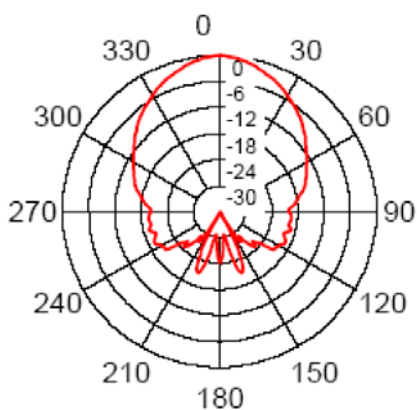
Tabulka 3– SRF10 Příkazy pro měření [3]

Zápisem do registru 1 se udává maximální zesílení v analogovém stupni. Během měření se každých 96 μ s zesílení zvyšuje od hodnoty 40 až na maximum. Změna analogového zesílení se provádí pokud chceme měření spouštět rychleji než po 65ms. Vhodnou hodnotu maximálního zesílení však ovlivňují předměty kolem snímače, proto se správná hodnota musí hledat.

Registr zesílení		Maximální analogové zesílení
Desítkově	Šestnáctkově	
0	0x00	40
1	0x01	40
2	0x02	50
3	0x03	60
4	0x04	70
5	0x05	80
6	0x06	100
7	0x07	120
8	0x08	140
9	0x09	200
10	0x0A	250
11	0x0B	300
12	0x0C	350
13	0x0D	400
14	0x0E	500
15	0x0F	600
16	0x10	700

Tabulka 4 – SRF10 Analogové zesílení [3]

Změnu vyzařovacího úhlu a šířky paprsku nelze měnit. Vyzařovací diagram SRF10 je kuželový a parametry jsou dány charakteristikou ultrazvukových měničů. Lze jen změnit rozsah a analogové zesílení. Mobilní robot nemusí používat celý dosah 6 metrů. Při změně analogového zesílení na 140 se dosah sníží přibližně na dva metry a sníží se i citlivost na objekty mimo osu snímače.



Obrázek 5 – SRF10 vyzařovací charakteristika [3]

3.1.5 Adresace

Pro připojení více snímačů SRF10 lze změnit I2C adresu. Adresace se provádí pouze při připojení jednoho snímače a zápisem tří sekvencí s novou adresou. Adresu snímače lze zpětně zjistit blikáním LED diody po připojení napájení. Pro nastavení adresace by na sběrnici mělo být pouze ovládací zařízení (např. mikrokontrolér) a jedno zařízení, na kterém chceme změnu adresy provést. Pokud by při adresaci bylo připojeno více zařízení, mohla by být adresa změněna na více zařízeních a docházelo by ke kolizím v komunikaci.

Adresa		Dlouhé bliknutí	Krátké bliknutí
Desítkově	Šestnáctkově		
224	E0	1	0
226	E2	1	1
228	E4	1	2
230	E6	1	3
232	E8	1	4
234	EA	1	5
236	EC	1	6
238	EE	1	7
240	F0	1	8
242	F2	1	9
244	F4	1	10
246	F6	1	11
248	F8	1	12
250	FA	1	13
252	FC	1	14
254	FE	1	15

Tabulka 5 – SRF10 Změna I2C adresy [3]

3.2 Modul kompasu CMPS03

CMPS03 byl vytvořen jako součást navigačního zařízení, složí k určení otočení robota. Jeho přesnost je uváděna 3-4°. Použitý snímač Philips KMZ51 s dostatečnou citlivostí indikuje magnetické pole země ze signálů dvou navzájem kolmých senzorů. Vypočítává směr horizontální složky geomagnetického pole země.

Výsledek měření lze získat dvěma způsoby. Přes I2C interface (vývody 2 a 3) nebo pomocí PWM šířkově modulovaného signálu (vývod 4). Vývod 7 umožňuje potlačení síťového rušení. Připojením vývodu 7 na nízkou úroveň nastavíme potlačení rušení pro 50Hz. Vývod 6 je určen pro kalibraci kompasu, která by měla být provedena před měřením.

3.2.1 Informace o azimutu – I2C

Komunikace probíhá obdobně jako u dříve popsaných ultrazvukových dálkoměrů SRF10. Adresa modulu je C0 (pro zápis) a C1 (pro čtení). Hodnota naměřeného azimutu se čte v registru č.1 (jeden byte – hodnota 0-255) nebo z registrů č.2 a 3 s rozlišením 0,1° (word – hodnota 0-3599).

Registr	Význam
0	Verze software
1	Azimut jako byte - přepočítaný na rozsah 0-255 (0°-360°)
2,3	Azimut jako word - přepočítaný na rozsah 0-3599 (0°-359,9°)
4,5	Test Senzoru 1
6,7	Test Senzoru 2
8,9	Kalibrační hodnota 1
10,11	Kalibrační hodnota 2
12	Nevyužito
13	Nevyužito
14	Nevyužito
15	Zahájení kalibrace(zápis 255)

Tabulka 6 – CMPS03 význam registrů [6]

Je nutné připojit pull-up rezistory na I2C sběrnici. CMPS03 pracuje vždy jako Slave a je navržen pro hodinovou frekvenci 100kHz. Může však být použit až do frekvence 1MHz za podmínky, že pro hodnoty hodinové frekvence nad 160kHz je nutnost vložit prodlevu 50μs před a za adresu registru, protože procesor kompasu neodpovídá dostatečně rychle na příkazy I2C sběrnice.

3.2.2 Informace o azimutu – PWM

Šířka pulsu ve vysoké úrovni přenáší informaci o směru natočení, mění se od 1ms do 36,99ms (0° až 359,9°). Šířka pulsu v nízké úrovni 65ms se nemění. Proto celková šířka signálu se mění v rozmezí 66ms až 102ms. Připojení dvojice rezistorů na vývody 2 a 3 je nutné i když se nepoužívá sběrnice I2C.

3.2.3 Kalibrace kompasu

Kompas je nutné před použitím nejprve zkalibrovat. Kalibrace může být provedena přes sběrnici I2C nebo připojením vývodu č.6. Kompas musí být ve vodorovné poloze a je nutné zapojit pin č.7 podle zvolené hodnoty potlačení síťového rušení (frekvence 50 nebo 60Hz).

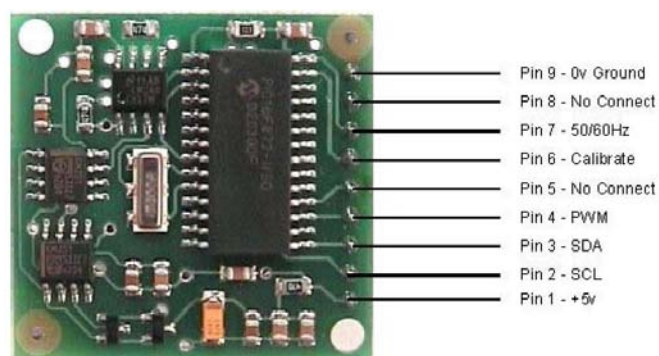
Kalibrace přes I2C:

Do registru č.15 zapíšeme hexadecimální hodnotu 0xFF. Modul postupně natáčíme od severu ve směru hodinových ručiček (Sever, Východ, Jih a Západ). Vždy při otočení kompasu o 90 stupňů zapisujeme hodnotu 0xFF.

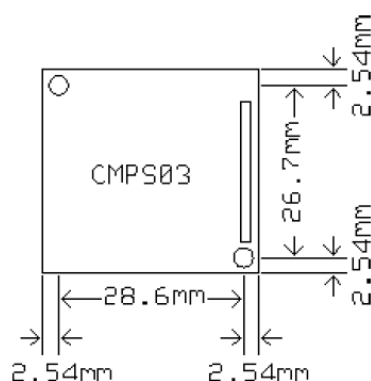
Kalibrace pinem č.6:

Obdobný postup jako u kalibrace pomocí I2C. Kalibrace se provádí změnou logické úrovně na pinu č.6 z logické 1 na logickou 0. Modul postupně natáčíme na světové strany, postupně od severu ve směru hodinových ručiček (Sever, Východ, Jih a Západ). Vždy při otočení kompasu o 90 stupňů měníme logickou úroveň na logickou 0 a hned zpět na logickou 1. Změna by měla být provedena rychle, proto se doporučuje použít tlačítko, které přivede na pin logickou 0.

3.2.4 Zapojení a Rozměry



Obrázek 6 – Zapojení CMPS03 [6]



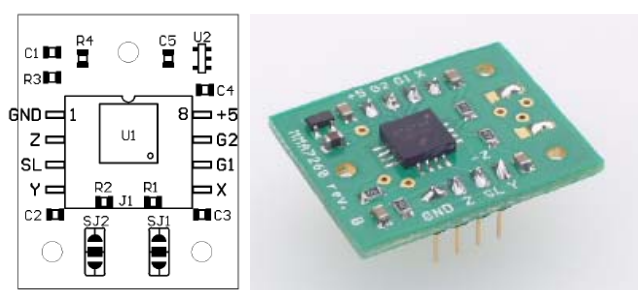
Obrázek 7 – Rozměrový náčrtek CMPS03 [6]

3.3 Modul tříosého akcelerometru ACC7260

Senzor MMA7260 je připájený na malém modulu s filtračními RC články a stabilizátorem napětí. Je možné modul osazovat do desky plošných spojů nebo nepájivého pole.

Integrovaný senzor zrychlení Freescale MAA7260 může měřit ve čtyřech rozsazích $\pm 1,5g$ až $6g$ (tabulka č.7) přepínatelných pomocí GSEL1 a GSEL2 (lze měnit buď pomocí vývodů G1 a G2 nebo propájením plošek SJ1 a SJ2). Při nulovém zrychlení je na příslušném vývodu osy napětí 1,65 (polovina napájecího napětí senzoru). Citlivost snímače je v rozmezí 200mV/g až 800mV/g podle zvoleného rozsahu.

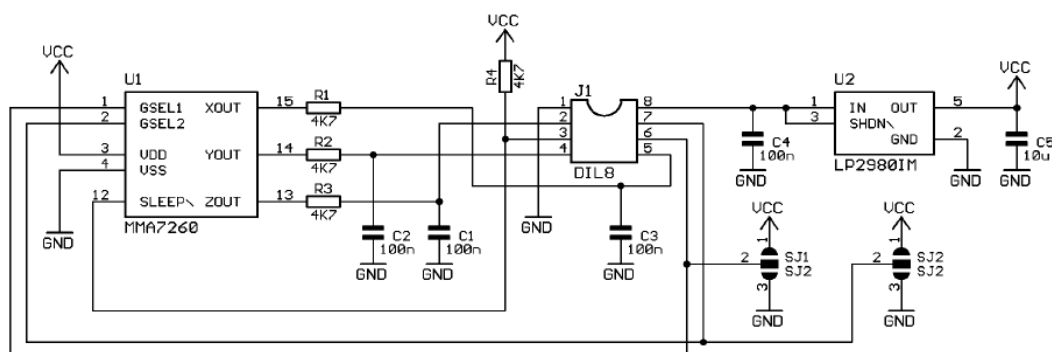
Pro snadnější využití je senzor připevněn na plošný spoj, kde jsou vyvedeny jednotlivé výstupy pro snadné zapojení včetně úpravy napájecího napětí. Napájecí napětí modulu je 5V.



Obrázek 8 – Vývody ACC7260 [7]

GSEL2	GSEL1	Rozsah	Citlivost
0	0	$\pm 1,5g$	800 mV/g
0	1	$\pm 2,0g$	600 mV/g
1	0	$\pm 4,0g$	300 mV/g
1	1	$\pm 6,0g$	200 mV/g

Tabulka 7 – Volba rozsahu ACC7260 [7]



Obrázek 9 – Vnitřní zapojení modulu ACC7260 [7]

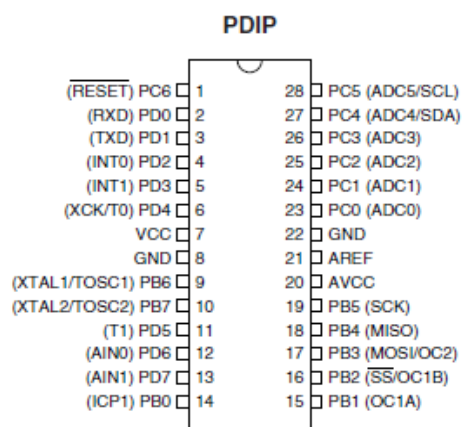
4 MIKROKONTROLÉR ATMEL MEGA 8

4.1 Popis

ATMEL Mega8 je výkonný 8mi bitový mikrokontrolér založený na RISC (Reduced Instruction Set Computer) architektuře. Tato architektura označuje procesory s redukovanou instrukční sadou, jejíž návrh je založen na jednoduchosti a optimalizaci sady strojových instrukcí. Procesor komunikuje s pamětí po sběrnici. Sada strojových instrukcí obsahuje hlavně jednoduché instrukce, délka provádění instrukce je vždy jeden cyklus (délka v bitech všech instrukcí je stejná) a využívá řetězení.

ATMEL Mega8 má 130 instrukcí, 32x 8mi bitové víceúčelové pracovní registry. Pracuje až do frekvence 16MHz. Obsahuje 8KB programovatelnou Flash paměť, 512B EEPROM, 23 programovatelných vstupních/výstupních pinů. Dále obsahuje jeden 16ti bitový dva 8mi bitové čítače/časovače. Napájecí napětí je v rozmezí 4,5-5,5V. Dostupná pouzdra jsou PDIP, TQFP a QFN/MLF. K mikrokontroléru je k dispozici dokumentace (datasheet) s přesným popisem funkcí.

Mikrokontrolér je řídicí jednotkou pro podvozek robota, dává signály pro řízení regulátoru otáček, řízení servomotoru pro natáčení kol, sbírá a vyhodnocuje data z připojených snímačů.



Obrázek 10 – Popis pinů ATmega8 [1]

4.2 Čítače a časovače

Důležitou funkcí mikrokontrolérů je čítání vnějších událostí, časových intervalů mezi nimi nebo jejich kmitočty. Čítání událostí lze u pomalejších dějů zajistit programem nebo sledováním hodnoty binárního signálu na příslušném vstupu nebo reakcí přerušením vyvolané změnou vstupního signálu. Čítání instrukcí je použitelné jen v omezené míře, kdy není třeba přesná hodnota, využívá se například pro čekání (zpoždění). V mnoha aplikacích je tato metoda nepříjemná, proto slouží podpůrné obvody schopné čítat vnější události a generovat časové intervaly nezávisle na procesoru.

ATMega8 zahrnuje 3 čítače/časovače (2x8bit, 1x16bit). Pretože samotný čítač/časovač nedovoľuje dostatočnú flexibilitu, je predžazen dělič s možnosťou výberu děličného poměru 1 až 1024 v krocích 1, 8, 64, 256 a 1024. Řídícím registrem I/O pro čítač/časovač 0 je TCCR0 (Timer/Counter0 Control Register).

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	–	–	–	–	–	CS02	CS01	CS00	TCCR0
Read/Write	R	R	R	R	R	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Obrázek 11 – TCCR0 (Timer/Counter0 Control Register)[1]

CS02	CS01	CS00	Význam
0	0	0	zastavení čítání, časovač/čítač 0 je zastaven
0	0	1	CK
0	1	0	CK/8
0	1	1	CK/64
1	0	0	CK/256
1	0	1	CK/1024
1	1	0	Externí vstup T0, sestupná hrana
1	1	1	Externí vstup T0, vzestupná hrana

Tabulka 8 – význam bitů TCCR0 [1]

Vlastní obsah čítače je prístupný v registru TCNT0 (timer counter 0). Príznak přetečení je v registru TIFR (Timer/Counter Interrupt Flag Register). Povolení/zakázání přetečení z přerušovače 0 je součástí registru TIMSK (Timer/Counter Interrupt Mask Register).

4.3 Sběrnice TWI

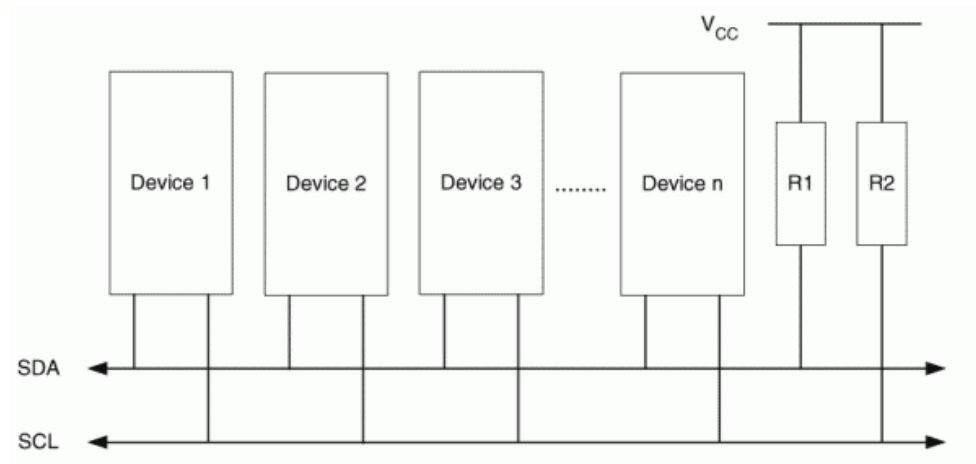
Atmel použil z licenčních důvodů název TWI (Two Wire Interface). Vše v podstatě shodné s rozhraním I2C, které vyvinula firma Philips Semiconductors pro připojení periferních zařízení Slave k jednomu Masteru.

Hlavní vlastnosti TWI:

- Jednoduché a flexibilní rozhraní řízené pomocí dvou vodičů,
- master i Slave mode (v AVR je možno použít současně), zařízení může pracovat jako vysílač i přijímač,
- sedmi bitová adresa dovoľuje připojit až 126 různých zařízení,
- možnost více Master zařízení na jedné sběrnici,
- rychlost přenosu až 400Mhz,
- programovatelná adresa zařízení (pro Slave).

4.3.1 Popis funkce

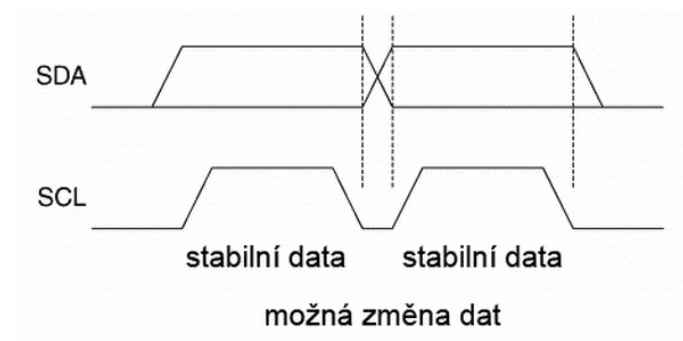
I²C umožňuje připojení až 128mi zařízení pomocí dvou vodičů. Pro data SDA (Serial Data) a druhý pro hodinový signál SCL (Serial Clock). Na každou linku je třeba připojit pull-up rezistory na napájecí napětí +5V (oba odpory mají stejnou hodnotu). Tyto odpory zvedají hodnotu napětí na hodnotu napájecího napětí, pokud není v činnosti žádné zařízení.



Obrázek 12 - Zapojení zařízení a pull-up rezistorů [2]

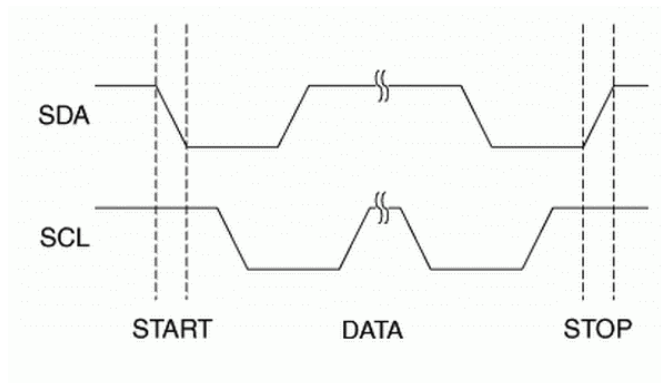
Master zařízení inicializuje a zakončuje vysílání, také generuje hodinové pulzy. Zařízení Slave má pevnou adresu. Pokud je na sběrnici adresa daného zařízení, pošle Slave zařízení potvrzovací puls a další data jsou přijímána nebo vysílána právě tímto zařízením. AVR procesor může pracovat ve čtyřech módech (Master přijímač, Master vysílač, Slave přijímač, Slave vysílač).

Každý vyslaný bit na sběrnici SDA musí být synchronizovaný s hodinovým pulsem SCL. Výjimku tvoří START a STOP bit.



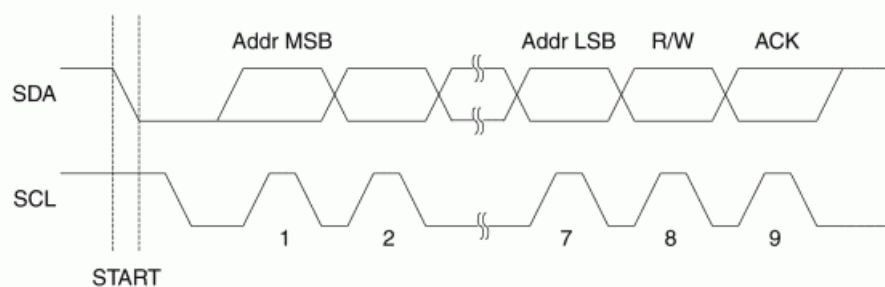
Obrázek 13 – Platnost dat [2]

Vysílání dat musí začínat tzv. START bitem (SCL v log.1 a SDA přejde z log.0 do log.1)



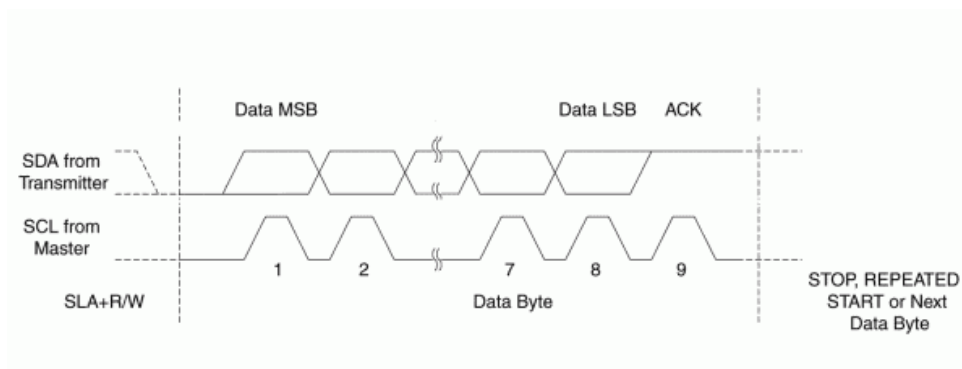
Obrázek 14 – STAR a STOP bity [2]

Každé zařízení má svou vnitřní datovou adresu, adresa se může na sběrnici opakovat, ale pak je možné komunikovat pouze s jedním zařízením. Po vyslání START bitu začne Master jako první vysílat adresový paket, aby bylo rozpoznáno zařízení, ke kterému připravená data patří. Všechny adresové pakety jsou 9bitů dlouhé (7bitů pro adresu, 1bit určující zda budeme ze zařízení číst nebo zapisovat a 1bit pro potvrzení shodující se adresy - vysílá Slave). Kontrolu potvrzovacího pulsu je možné neprovádět, ale není jistota, že lze s volaným zařízením komunikovat. Pokud potvrzovací puls není přijat, znamená to, že zařízení je zaneprázdněno nebo není vůbec na sběrnici připojeno. Adresu 0x00 je možné využít, pokud chceme všem zařízením na sběrnici poslat společnou zprávu. Adresu 0x01 nelze použít (čtení ze všech zařízení).



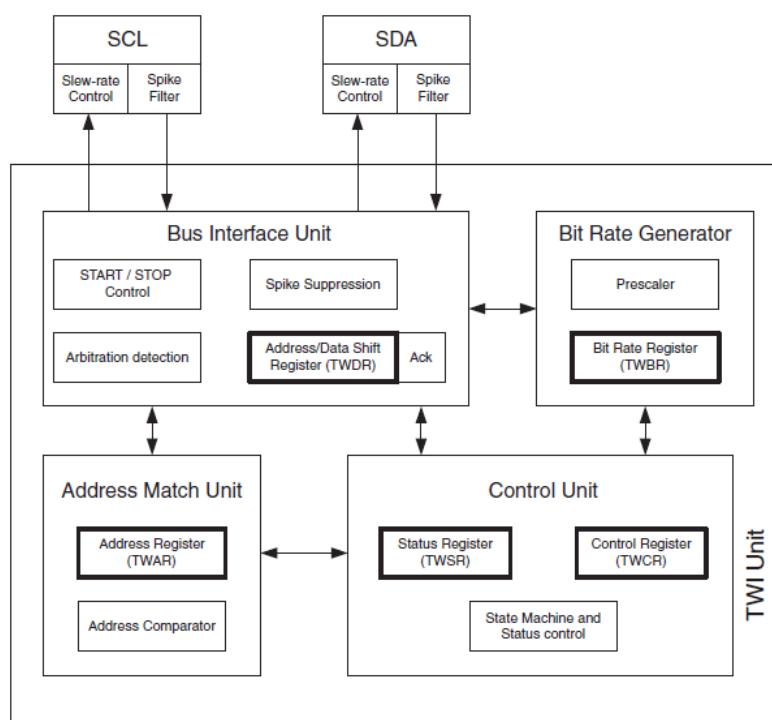
Obrázek 15 – Přenos adresového paketu [2]

Po odvyslání, případně přijmutí potvrzovacího pulsu lze vysílat data. Vyslaná data mají délku 8bitů zakončené potvrzovacím pulsem. Po přijetí potvrzovacího pulsu lze vysílat další paket dat nebo STOP bit a ukončit komunikaci se zařízením.



Obrázek 16 – Přenos datového paketu [2]

4.3.2 TWI modul



Obrázek 17 - Přehled jednotlivých částí a jejich propojení [2]

SCL a SDA piny jsou vybaveny filtrem šumů a špiček kratších jak 50ns a řízením toku dat (čtení nebo zápis). Jednotka rozhraní obsahuje logiku pro vysílání a přijímání START/STOP bitu, datový registr TWDR, synchronizaci s jiným Masterem. Řídící jednotka obsahuje registr stavu TWSR a řídicí registr TWCR. Generátor hodinových pulsů obsahuje nastavení rychlosti vysílání a děličku. Adresová jednotka obsahuje registr TWAR, kde se zapisuje adrese pro režim Slave.

Rychlost je dána vztahem: $f_{\text{frekvenceSCL}} = \frac{f_{\text{frekvenceCPU}}}{16 + 2 * TWBR * 4^{TWPS}}$, kde registr TWBR (bit rate register) určuje bitovou rychlost a TWPS (status register) obsahuje informaci o dělicí hodnotě (nastavení bitů TWPS1 a TWPS0).

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	TWBR7	TWBR6	TWBR5	TWBR4	TWBR3	TWBR2	TWBR1	TWBR0	TWBR
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Obrázek 18– Registr TWBR (rychlost SCL) [2]

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	TWS7	TWS6	TWS5	TWS4	TWS3	–	TWPS1	TWPS0	TWSR
Read/Write	R	R	R	R	R	R	R/W	R/W	
Initial Value	1	1	1	1	1	0	0	0	

Obrázek 19 – Registr TWSR (registr stavu) [2]

V řídicím registru TWCR (control registr) se nastavují jednotlivé bity pro komunikaci, pokud chceme něco odvíšlat, jako jsou START a STOP bity, adresu nebo data.

TWINT bit příznaku přerušení (Interrupt flag) je nastavován procesorem při dokončení každé operace. TWEA bit (Enable Acknowledge) povoluje potvrzovací puls, který má význam v režimu Slave. Zapsáním jedničky do bitu TWSTA (Start condition bit) se zařízení stane nastavit na typ Master a kontroluje zda je sběrnice volná. Pokud sběrnice je volná, generuje START bit. Odesláním jedničky do bitu TWSTO (Stop condition bit) se vysílá STOP bit. TWWC (Write collision flag) kontroluje kolizi, pokud se snažíme zapsat do registru TWDR, ale TWINT je stále nastaven na nulu. TWEN (TWI Enable) povoluje TWI operace, pokud je bit nulován TWI je vypnutý. TWIE (Interrupt enable) povoluje přerušení od TWI.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	TWINT	TWEA	TWSTA	TWSTO	TWWC	TWEN	–	TWIE	TWCR
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R	R/W	R	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Obrázek 20 – Registr TWCR (řídicí registr) [2]

4.4 I/O porty

Mikrokontroléry ATmega8 mají tři obousměrné brány - PORT B (6bitů), PORT C (7bitů) a PORT D (8bitů). Brány jsou mapovány vždy na tři adresy (např.: vstupní vývody PINB, výstupní registr PORTB a směrový registr DDRB). PINn není registr, tato adresa umožňuje přístup k fyzické hodnotě vlastního portu. Na adrese vstupních/výstupních vývodů jsou přístupné skutečné úrovně na vývodech integrovaného obvodu, na adrese výstupního registru lze zapisovat výstupní data.

Směrový registr udává funkci příslušného vývodu. Vývody mohou být v logické 0 zatíženy proudem až 20mA.

DDAn	PORTn	I/O	Stav vývodu
0	0	Vstup	Velká impedance (otevřený kolektor v log.1)
0	1	Vstup	Připojen zatěžovací odpor, vstup může být zdrojem proudu
1	0	Výstup	Výstup v log.0, otevřený kolektor
1	1	Výstup	Výstup v log.1, otevřený kolektor

Tabulka 9 – Stav vývodů [1]

4.5 AD převodník

Měření napětí nebo veličin, které se dají na napětí převést je obsaženo v mnoha aplikacích jednočipových mikropočítačů. U mikrokontroléru ATmega8 máme možnost využít šest AD převodníků s až deseti bitovým rozlišením. Tak vysoké rozlišení mnohdy není třeba, s nižším rozlišením je menší doba převodu, tedy získáme rychlejší převod.

Průměrná doba konverze je 13-260μs. ATmega8 má nastavitelné rozlišení převodníku, nastavitelnou vnitřní referenci 2,56V, možnost volby mezi kontinuálním během a ručním spuštěním. Je i možnost spuštění přerušování po dokončení převodu.

AD převodník používá několik speciální registrů pro řízení (základní: AMUX, ADCSRA, SFIOR).

V registru AMUX se pomocí bitů REFS1 a REFS0 nastaví analogová reference (tabulka .č.10). Při vnitřní referenci nesmí být na vývodu AREF připojeno vnější napětí, ale kondenzátor. ADLAR určuje na kterou stranu se bude výsledek zarovnávat. Správným nastavením MUX3 –MUX0 vybereme kanál pro převod (zvolená hodnota 0-5) nebo kanály, kde se převádí rozdíl mezi nimi (hodnoty 8-29). Lze také na vstup převodníku přivést napětí 1,22V (hodnota 30) nebo 0V (hodnota 31).

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	REFS1	REFS0	ADLAR	–	MUX3	MUX2	MUX1	MUX0	ADMUX
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Obrázek 21 – Registr AMUX AD převodníku

REFS1	REFS0	nastaví analogová reference
0	0	vnější reference
0	1	AVCC(na bit AREF připojen kondenzátor)
1	0	-
1	1	vnitřní reference 2,56V

Tabulka 10 – Nastavení analogové reference AD převodník

Registr ADCSRA řídí převod a podává informace o stavu převodu. Bit ADEN zapíná a vypíná AD převodník, pokud však již probíhá převod, je ihned ukončen. Po nastavení bitu ADSC, je převod zahájen, pokud převod probíhá, je bit nastaven, při ukončení převodu je nulován. ADIF je příznak přerušení po dokončení AD převodu a ADIE je povolení přerušení od AD převodníku. Pomocí bitů ADPS2-ADPS0 se nastaví před-dělička hodin pro AD převodník (2, 2, 4, 8, 16, 32, 64 a 128).

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	ADEN	ADSC	ADFR	ADIF	ADIE	ADPS2	ADPS1	ADPS0	ADCSRA
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Obrázek 22 – Registr ADCSRA AD převodníku

Do dvojice registrů ADCH a ADCL se zapisuje výsledná hodnota převodu. Čtení těchto registrů by mělo probíhat nejprve z ADCL, potom z ADCH, to pro jistotu že čteme výsledek právě dokončeného převodu.

Bit	15	14	13	12	11	10	9	8	
	–	–	–	–	–	–	ADC9	ADC8	ADCH
	ADC7	ADC6	ADC5	ADC4	ADC3	ADC2	ADC1	ADC0	ADCL
Read/Write	R	R	R	R	R	R	R	R	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Obrázek 23 - Registry ADCH a ADCL pro ADLAR=0

Bit	15	14	13	12	11	10	9	8	
	ADC9	ADC8	ADC7	ADC6	ADC5	ADC4	ADC3	ADC2	ADCH
	ADC1	ADC0	–	–	–	–	–	–	ADCL
Read/Write	R	R	R	R	R	R	R	R	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

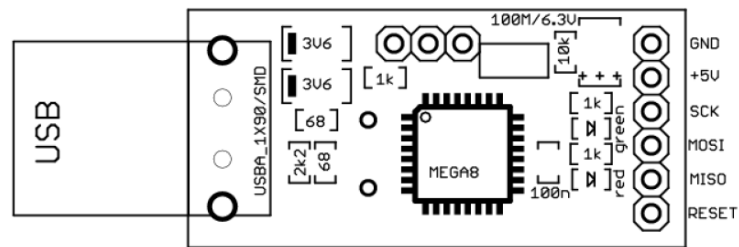
Obrázek 24 - Registry ADCH a ADCL pro ADLAR=1

4.6 AVR Studio 4

Program AVR Studio 4 slouží pro psaní a odladění programů procesorů AVR. Lze prohlížet podrobné stavy na vstupech a výstupech, registrech procesoru apod. Umožňuje sdružování zdrojových souborů do projektu. Součástí programu je i překladač zdrojových souborů ASM do formátu HEX.

4.7 Programátor

USBasp je programátor pro mikrokontroléry ATMEL. Připojení je přes USB, v PC musí být nainstalovaný příslušný driver podle použitého operačního systému. Programování připojeného mikrokontroléru lze provést několika cestami (např. pomocí Khazama AVR Programmer, z programu AVRStudia za pomoci Makefile a AVRdude). Při programování přes Khazama AVR pouze vybereme příslušný soubor ve formátu HEX a daný mikrokontrolér.



Obrázek 25 – Zapojení USBasp k ATmega8 [4]



Obrázek 26 - Programátor USBasp

5 KOMUNIKAČNÍ MODULY

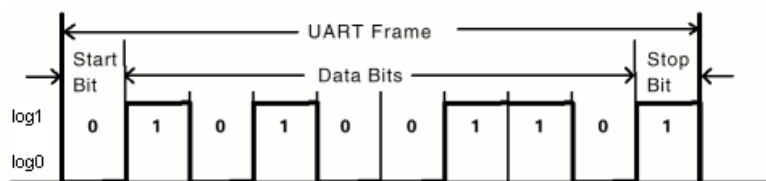
Robot je určen pro testování komunikačních modulů v praxi, při jeho provozu může být spuštěno měření, které zjistí sílu signálu, počet chybných bytů a chybné byty vykreslí do grafu. K dispozici byly tři komunikační moduly RSX150 od firmy Wood&Souhlas, Bluetooth OMSPA310 od firmy ConnecBlue a RE400 od firmy Racom. RSX150 a RE400 používají komunikaci RS232, v tabulce č.13 je význam jednotlivých pinů na použitém konektoru Cannon9.

	Frekvence	Výkon	Dosah	Max. rychlost / kanál
RSX450	451 MHz	500 mW	desítky km	9600 Bd / 25kHz
RE400	399 MHz	2W	desítky km	112 kBd / 25kHz
OMSPA310	2,4GHz	2,2 mW	až 75 m	921,6 kBd

Tabulka 11 – Srovnání komunikačních modulů

5.1 RS232

RS232 je velmi rozšířené komunikační rozhraní mezi počítači a jinou elektronikou. Umožňuje sériovou komunikaci dvou zařízení, jednotlivé přenášené bity jsou posílány za sebou po jednom vodiči. V našem případě byl zvolen 10bitový přenos (Start bit, 8 datových bitů, Stop bit, bez paritního bitu). Přenos datového slova o délce 8mi bitů je znázorněn na obrázku č.27. RS232 má zápornou logiku (tabulka č.12).



Obrázek 27 – Zvolený přenos dat RS232

Datové signály		
Úroveň	Vysílač	Přijímač
Log. L	+5 V do +15 V	+3 V do +25 V
Log. H	-5 V do -15 V	-3 V do -25 V

Řídící signály		
Signál	Driver	Terminátor
"Off"	-5 V do -15 V	-3 V to -25 V
"On"	5 V do 15 V	3 V do 25 V

Tabulka 12 - Napěťové úrovně RS232 Datové a řídicí signály

Pin	Označení	Směr	Anglický název	Význam
1	CD	←	Carrier Detect	Detekce nosné
2	RXD	←	Receive Data	Tok dat do terminálu
3	TXD	→	Transmit Data	Tok dat z terminálu
4	DTR	→	Data Terminal Ready	Terminál připraven komunikovat
5	GND		Ground	Signálová zem
6	DSR	←	Data Set Ready	Vzdálený terminál připraven komunikovat
7	RTS	→	Request to Send	Žádost o vysílání
8	CTS	←	Clear to Send	Volno pro příjem
9	RI	←	Ring Indicator	Zvonek

Tabulka 13 – Význam pinů na konektoru samce Cannon9 pro RS232

5.2 Wood&Douglass RSX150

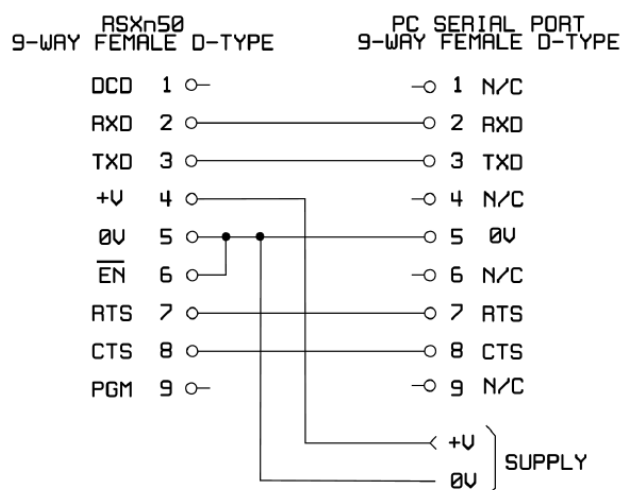
Celá výrobní série RSX je skupina univerzálních vysokorychlostních radiomodemů poskytujících plně transparentní poloduplexní přenos dat na vzdálenost až několika kilometrů. Používají GMSK modulaci a dosahují rychlosti 4800Bd na kanálu 12,5kHz nebo 9600Bd na kanálu 25kHz.

RSX 150 jsou určené pro přenos dat v úzkých kmitočtových pásmech VHF a UHF. Sériová data jsou do modemu a z něj předávána přes port RS232 rychlostí až 38400Bd.



Obrázek 28 – Radiomodem RSX 150 [10]

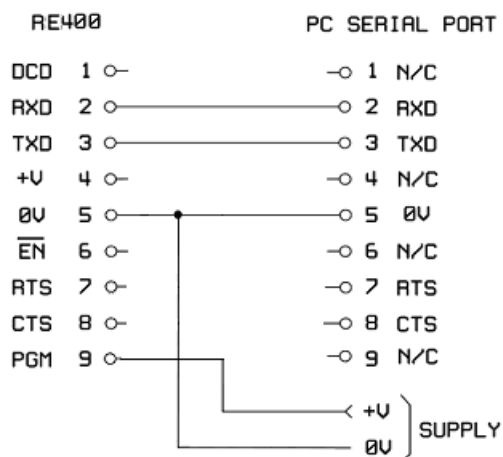
Napájecí napětí modulů je 9 až 15V, které je připojeno přes 9pinový konektor spolu se signály obsluhující sériovou komunikaci.



Obrázek 29 – Schéma připojení radiomodemu RSX150 k PC [10]

5.3 Racom RE400

RE400 je transparentní radio modem pro bezdrátový datový přenos. Je vybaven Ethernetem nebo RS232, přes tyto konektory se přivádí i zdroj napětí (pro RS232 je to pin č.9). Poskytuje široký rozsah nastavení pomocí softwaru. Konfigurace se provádí přes běžný internetový prohlížeč. Konstrukce radiomodemu je navrhována tak, aby jednotlivé komponenty nebyly zatěžovány nadměrným přehřátím, kovové pouzdro odvádí dobře odvádí teplo. Modem je určen pro aplikace v trvalém provozu.



Obrázek 30 – Radiomodem Racon RE400 a zapojení konektoru RS232 [11]

RE400			
	Radio	RS232	Ethernet
Product Type: RE410 Ser No.: 7347743 FW: 2.1.5.0 ver.:	Frequency: MHz kHz Hz 402 125 000	Baud rate: 19200	IP: 192 168 1 47
	Channel spacing: 25 kHz / 10.4 kbps	Data bits: 8	Mask: 255 255 255 0
	RF Power: 0.3W	Parity: None	GW: 192 168 1 47
	Fragment threshold [bytes]: 1480	Stop bits: 2	
Diagnostics Ping Error log	Repeater: No	Idle [bytes]: 10	
	Number of repeaters: 0	MTU [bytes]: 4000	
Settings RE400.config		Handshake: None	

Obrázek 31 – Možnost nastavení RE400 [11]

5.4 OEMSPA310

OEM Serial port adapter 310 je bluetooth modul třídy 2.0. Je založený na systému Philips BGB203. Modul je dostupný pouze v konfiguraci s interní anténou a nemá žádný konektor pro externí anténu. Jeho velkou výhodou je jeho cena a malé rozměry. Konfigurovatelný je pře Bluetooth pomocí příslušného softwaru. Maximální dosah na volném prostranství je 75 metrů.

Pro připojení signálů má na zadní straně 20ti pinový konektor, význam námi využitých pinů, které byly připojeny na výstupy UART mikrokontroléru je v tabulce č.14.

Pin	Význam
1-2	GND
3-4	PWR
15	CTS
16	TxD
17	RTS
18	RxD
19	DTR
20	DSR

Tabulka 14 – Využité piny na OEMSPA310

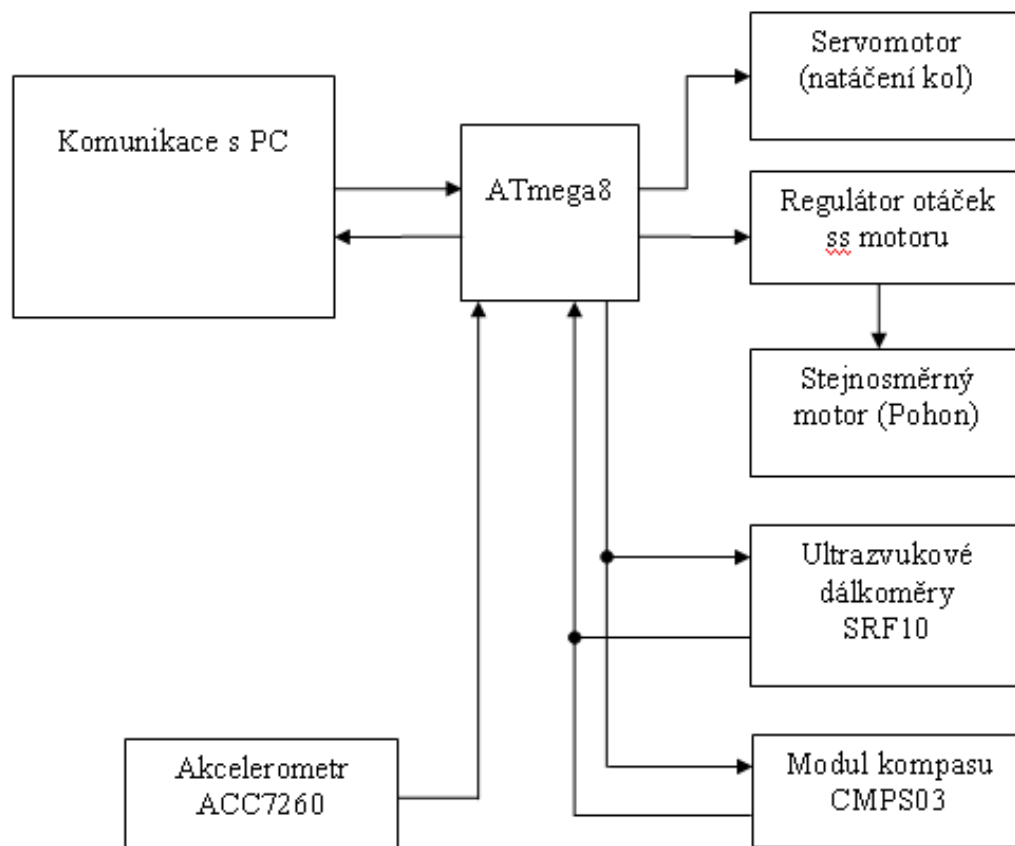


Obrázek 32 – Bluetooth modul OEMSPA310

6 REALIZACE

6.1 Program pro řízení podvozku - ATMEGA8

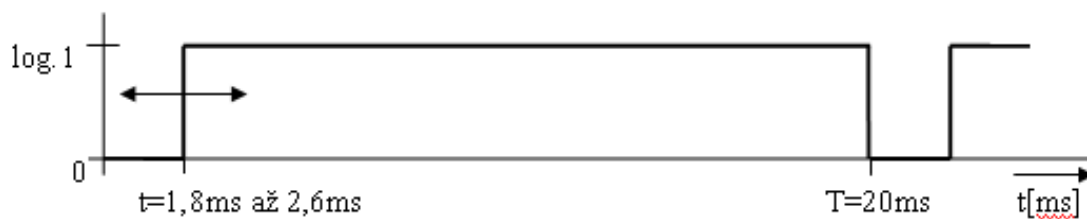
Program je psán s použitím programu AVR Studio 4. Program řízení podvozku přijímá data z PC, podle kterých provádí celkový pohyb (rychlost a natáčení kol), komunikuje s ultrazvukovým dálkoměrem SRF10, kompasem CMPS03 a měří výstupní napětí z akcelometru ACC7260.



Obrázek 33 – Blokové zapojení ATmega8

6.1.1 Řízení podvozku

Pro natáčení kol mikrokontrolér generuje různé šířky pulzu, které jsou přivedené na signálový vodič servomotoru. Perioda pulsu je 20ms, šířkou pulsu volíme natočení servomotoru. Hodnota šířky pulzu je přímo posílána programem z počítače, posílá se v rozmezí 1,8ms až 2,6ms (plné zatočení vpravo až plné zatočení vlevo), po tuto dobu je část periody signálu v logické 0.

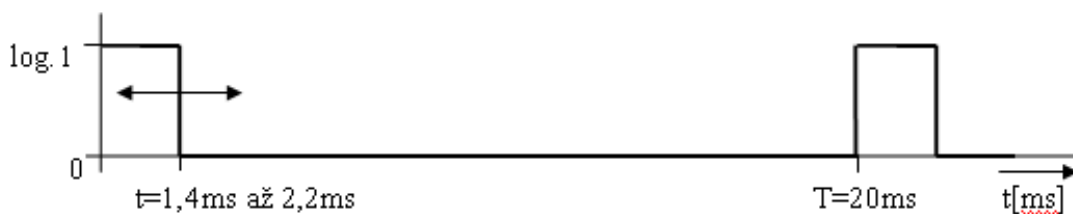


Obrázek 34 – Časový průběh signálu pro servomotor

Natočení [°]	délka t [ms]
-30	2,6
-15	2,3
0	2,1
15	2,0
30	1,8

Tabulka 15 – Příklad natočení kol a jejich hodnoty začátku pulsu

Řízení regulátoru otáček (Speedstar2) je obdobné jako u servomotorů pomocí různé šířky pulzu. Šířka pulzu je posílána z počítače v rozmezí 1,4ms až 2,2ms, zde je však definována délka logické 1 v jedné periodě.



Obrázek 35 – Časový průběh signálu pro regulátor otáček

Pohyb	délka t [ms]
Max vzad	1,4
Stůj	1,5
Max vpřed	2,2

Tabulka 16 – Příklad hodnot pro ovládání regulátoru otáček

6.1.2 Ultrazvukový dálkoměr

Program komunikuje s ultrazvukovým dálkoměrem přes FWI (I2C). Frekvence SCL byla zvolena na 100kHz (může být až do 400kHz). Důležitým faktorem pro správné nastavení rychlosti je výpočet TWBR. Nebyl použit žádný dělič, tím se vzorec zjednodušil. Použitý krystal má hodnotu 10MHz.

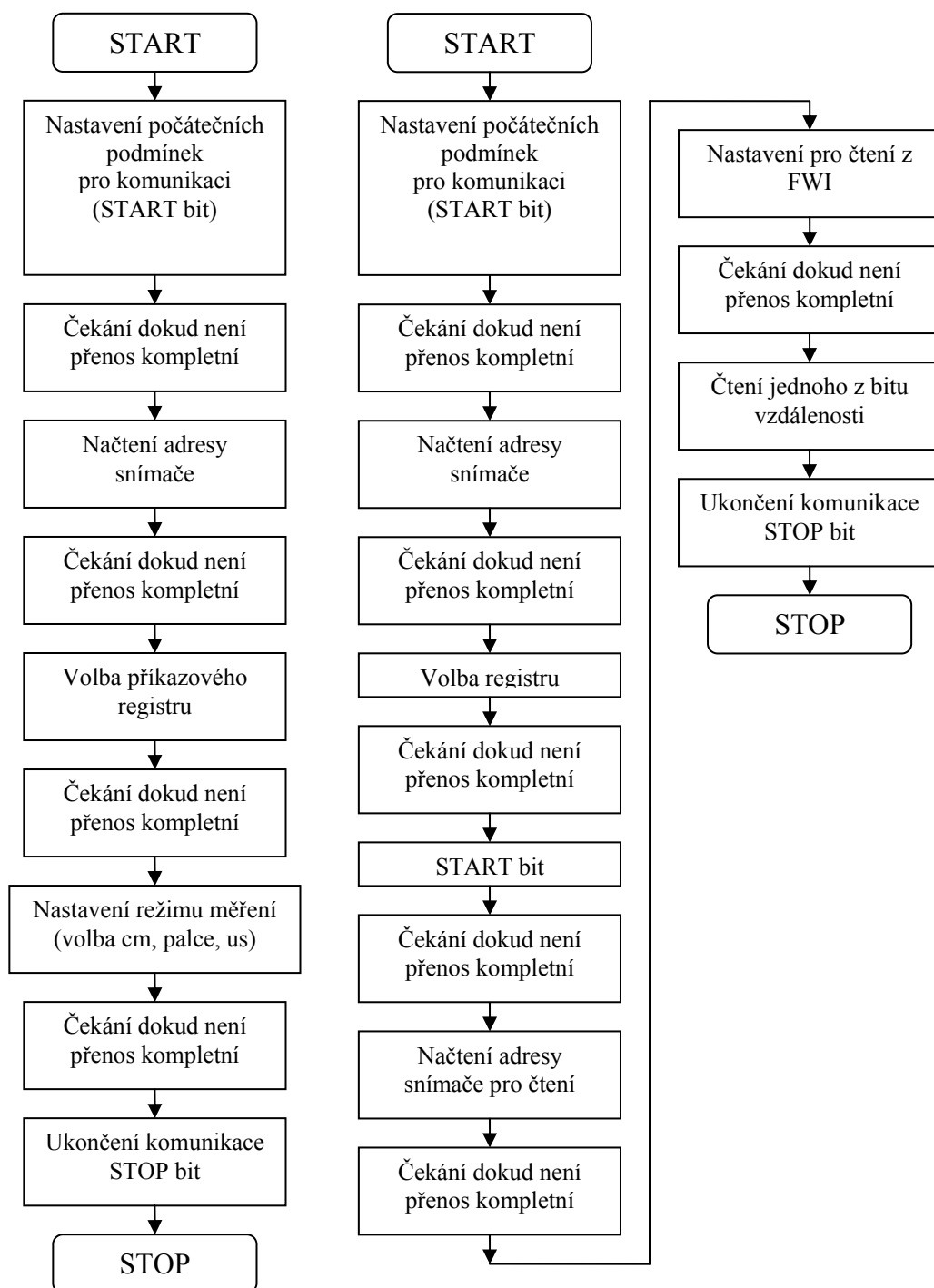
$$frekvenceSCL = \frac{frekvenceCPU}{16 + 2 * TWBR} \Rightarrow TWBR = \frac{\left(\frac{frekvenceCPU}{frekvenceSCL} - 16\right)}{2}$$
$$TWBR = \frac{\left(\frac{10000000}{100000} - 16\right)}{2} = 42$$

V kapitole 3.SNÍMAČE byly popsány funkce a vlastnosti SRF10. Protože jsme využívali více zařízení na FWI (I2C), bylo nutné změnit snímačům adresy.

Číslo snímače	Adresa
1	0xE0
2	0xE2
3	0xE4
4	0xE6
5	0xE8
6	0xEA

Tabulka 17 – Adresy ultrazvukových snímačů SRF10

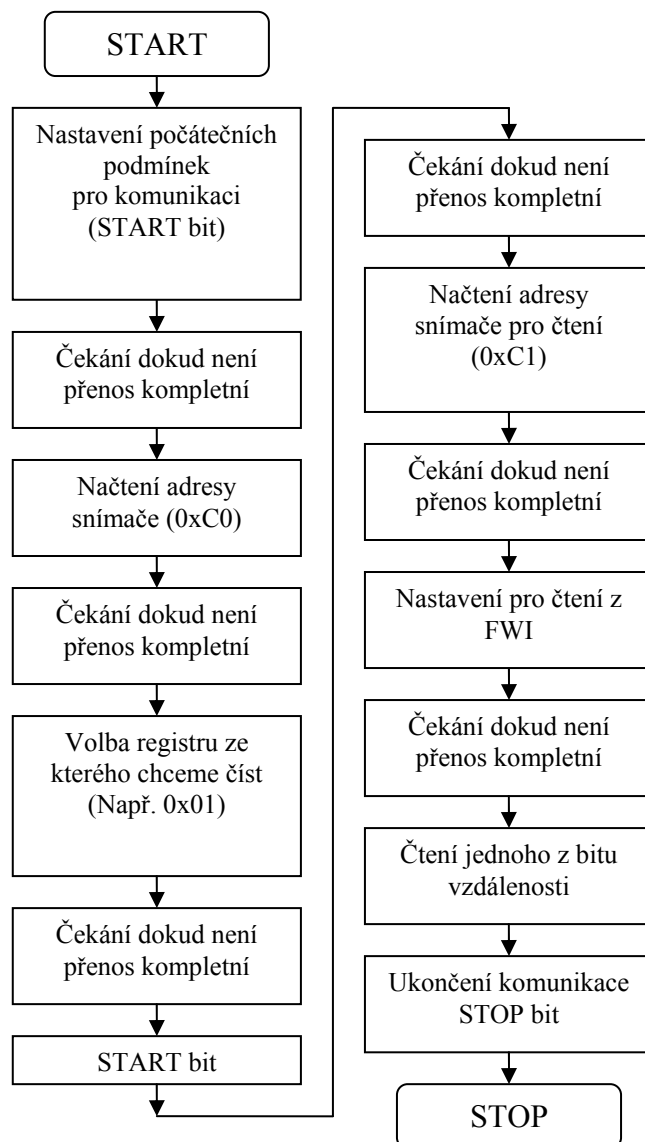
Dále jsou zobrazeny diagramy, popisující realizaci komunikace při zápisu nebo čtení dat do ultrazvukových dálkoměrů SRF10.



Obrázek 36– Vývojový diagram pro vysílání dat přes FWI do SRF10 (vlevo) a vývojový diagram pro přijímání bitu vzdálenosti ze SRF10 (vpravo)

6.1.3 Kompas CMPS03

CMPS03 komunikuje přes I2C sběrnici, takže byl připojen společně s ultrazvukovými dálkoměry SRF10. Adresa snímače je 0xC0. Komunikace probíhá obdobně jako u ultrazvukových dálkoměrů.



Obrázek 37 – Vývojový diagram příkladu komunikace CMPS03

6.1.4 Akcelerometr ACC7260

Výstupy X a Y z akcelerometru jsou přivedeny na vstupy A/D převodníku (ATMega8 piny 23 a 24). Podle předchozího měření je využita lineární část charakteristiky snímače. Pájecí plošky SJ1 a SJ2 byly propájeny na 0V, pro nastavení rozsahu akcelerometru $\pm 1,5g$.

6.1.5 Stručný popis zdrojového kódu pro ATmega8

Na začátku programu je deklarace využívaných knihoven pro standardní vstup a výstup, práce s proměnnými, datové převody, definice periférií procesoru a funkcí pro řízení přerušení.

Definuje se jaký máme připojený oscilátor, tedy frekvence CPU, dále frekvence I2C(TWI) a rychlost pro sériovou komunikaci UART.

Pro přehlednost a zjednodušení programu jsou vytvořeny malé funkce, které jsou volány podle potřeby s určitými parametry.

Hlavní program:

`void main (void)` – nastavení počátečních vstupů a výstupů, definice vstupů/výstupů. Nastavení časovačů 0 a 1, povolení přerušení, inicializace AD převodníku a volání funkcí pro inicializaci UART komunikace a I2C sběrnice. Následuje nekonečná smyčka, kde probíhá měření na ultrazvukových dálkoměrech, magnetometru CMPS03 a měření napětí z akcelerometru ACC7260 pomocí převodu napětí na AD převodnících. Data z AD převodníku jsou převedeny na řetězec, tyto a ostatní naměřené hodnoty jsou uloženy do proměnných, ze kterých je čteno pokud PC čeká na odpověď.

Funkce:

`void twi_init(void)` – inicializace I2C (TWI), tato funkce je volaná pouze jednou v hlavním programu před nekonečnou smyčkou. ATmega8 jako master zařízení musí inicializovat komunikaci na celé sběrnici.

`void init_UART (void)` – inicializace sériové komunikace. Probíhá povolení přerušení a povolení vysílání.

`void delay(unsigned int ms)` – funkce pro zajištění časového zpoždění v milisekundách.

`void twi_vysilani(char sxadr,char povel)` – pracuje na principu viz kapitola 6.1.2., zahajuje měření na základě zadaných parametrů adresy zařízení na I2C sběrnici a požadovaného povelu (např. měření v centimetrech pro SRF10)

`unsigned int srf(char sxadr,char reg)` – volá funkci pro příjem bitu (`twi_prijem`). Vrací přijatá data po převodu na unsigned int pro další zpracování v programu.

`void twi_zesileni(char sxadr,char zesileni)` – slouží pro změnu parametru zesílení ultrazvukového dálkoměru SRF10.

`void twi_rozsah(char sxadr,char rozsah)` – slouží pro změnu parametru velikosti rozsahu ultrazvukového dálkoměru SRF10.

`char twi_prijem(char sxadr, char reg)` - čtení dat ze zařízení na sběrnici I2C, pracuje na principu viz. kapitola 6.1.2. Podle zadaných parametrů čte z uvedeného zařízení a jeho registru. Vrací přijatý byte.

`unsigned char getc_UART(void)` – příjem znaku ze sériové komunikace, voláno v přerušení po přijatém znaku. Vrací přijatý znak.

`unsigned int read_adc(int osa)` – parametr se kterým je funkce volána je číslo AD převodníku, na kterém je zahájeno následně měření. Funkce vrací naměřenou hodnotu.

`void send_UART(char)` – posílání znaku přes sériovou linku (UART)

`void changeAddress (char addrnow, char addrwant)` – funkce je využívána při nastavení adres nových zařízení na I2C sběrnici. Celá nekonečná smyčka byla při využití tohoto podprogramu zakomentovaná. Při volání podprogramu musí být na sběrnici pouze jedno zařízení, na kterém chceme provést změnu adresy. V parametrech je aktuální adresa zařízení a adresa, kterou chceme zařízení dát.

`void ftoa(float flt, char * str, int m)` – převod datového typu float na řetězec char. Parametry funkce jsou - hodnota float, řetězec kam se převedená hodnota uloží a počet desetinných míst.

`void data_send(void)` – je volán několikrát v nekonečné smyčce hlavního programu, vždy po jednotlivém ukončeném měření ultrazvukovým snímačem. Pokud jsou přijatá určitá data z PC, podprogram odesílá jako odpověď naměřené hodnoty od všech snímačů. Toto odesílání hodnot není napsáno v podprogramu přerušení, protože při tom docházelo k zatuhnutí programu z důvodu přístupu k hodnotám v nesprávný okamžik (při komunikaci s čidly připojenými na I2C).

Přerušení:

`SIGNAL (SIG_OVERFLOW0)` – přerušení od časovače 0, pokud po dobu 2 vteřin nepřijde od PC žádný příkaz, zastavuje pohyb robota. Nastavené 2 vteřiny je dlouhá doba pro zabránění nárazu, ale tato hodnota je zvolena protože každý modul, který se může na robotu testovat má jiné parametry (např. rychlost přepnutí z vysílání na příjem).

`SIGNAL (SIG_INPUT_CAPTURE1)` – přerušení od časovače 1, ovládá PWM pulzy pro servomotor a regulátor otáček podle přijatých povelů.

`SIGNAL (SIG_UART_RECV)` – přerušení při přijatém znaku ze sériové linky. Dekóduje přijatou zprávu o jaký povel se jedná a jakou má hodnotu.

6.2 Ovládací program Builder 2007

V aplikaci Borland Builder 2007 byl vytvořen ovládací program s vizualizací naměřených výsledků a měřením signálu komunikace.

Program pracuje ve dvou módech, buď posílá data pro ovládání robota, nebo provádí měření signálu komunikace.

Při ovládání robota program posílá pomocí sériového rozhraní povely pro robota. Na obrazovce se vypisuje „Data send“ pokud byl vyslán příkaz. Zobrazení přijatých zpráv na obrazovce slouží pro kontrolu běžící komunikace a kontrolu funkčnosti. Robot je ovládán pomocí počítačového joysticku Saitek ST290, pro řízení je třeba pouze ovládací páka a regulátor rychlosti na joysticku. Pozice joysticku je přepočítána na počet milisekund, tedy doba logické 1 nebo logické 0 v signálu PWM pro řízení regulátoru otáček a servomotoru pro zatáčení (viz. Řízení podvozku), obojí má lineární charakteristiku. Pozice joysticku je pro orientaci číselně i graficky zobrazena na obrazovku. To pomáhá odhadnout, zda je joystick správně nakalibrován (rozsah jeho tří os je 0 až 65535 hodnot). Rychlost s jakou se robot pohybuje je vyznačena pomocí bargrafu, vyznačená linka je hranice, od které se rychlost zvyšuje. Pokud je rychlost nastavena pod touto úrovní, tak robot jede nejmenší možnou rychlostí, kterou dovoluje.

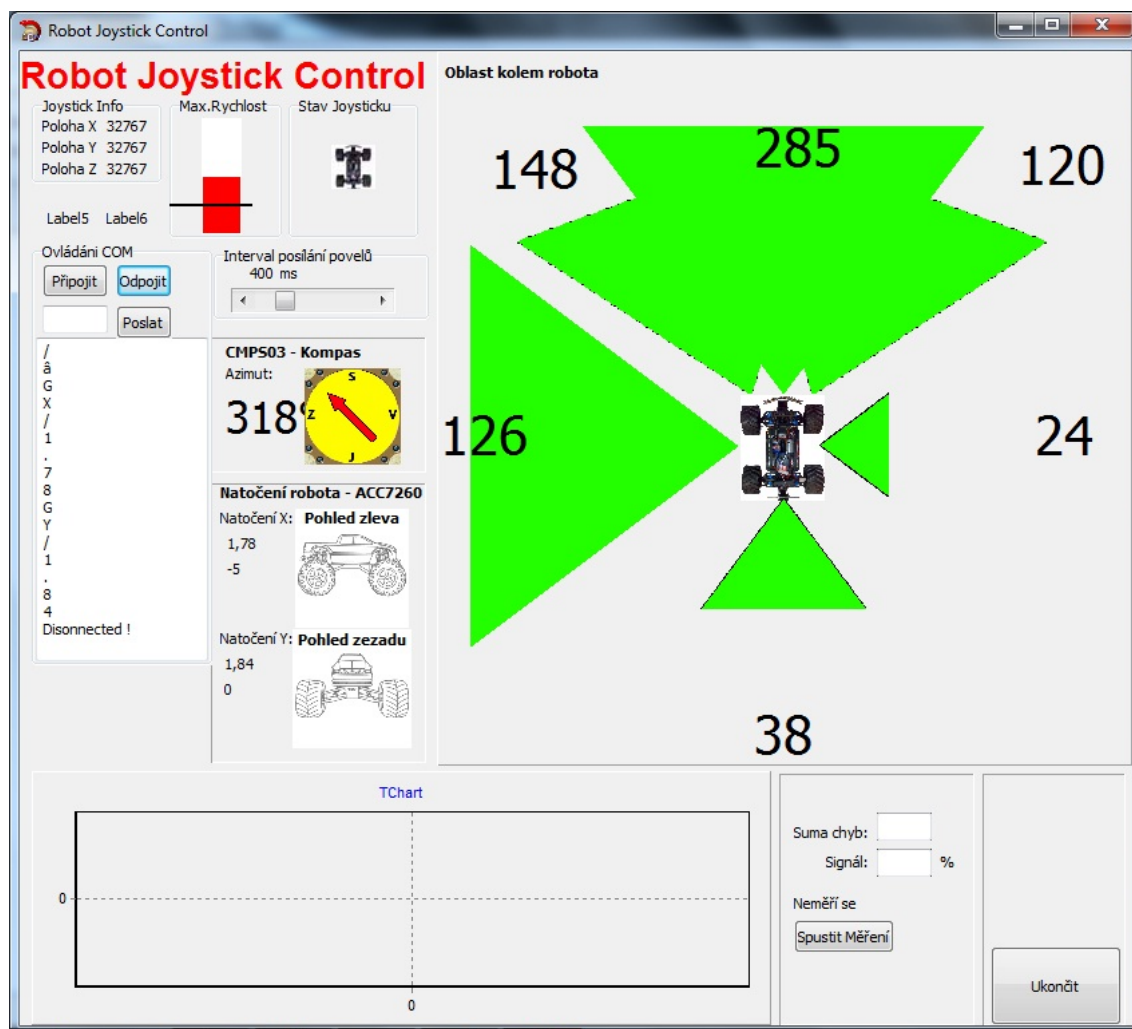
Program přijímá hodnoty z ultrazvukových senzorů SRF10 a zobrazuje číselně a graficky na zelených trojúhelnících jejich hodnotu. Za chodu programu lze měnit parametry ultrazvukových senzorů SRF10 (zesílení a rozsah), ty však není třeba měnit od defaultních hodnot (nastavených na maximum).

Data z kompasu CMPS03 jsou přepočítány z rozsahu char 0-255 na 0-360°, poté číselně a graficky zobrazeny na obrazovku.

Velikost předního a bočního náklonu udává naměřená hodnota dvou AD převodníků. Ty měří napětí na výstupech X,Y akcelerometru ACC7260. Získaná hodnota je přímo posílána do PC, kde je podle předešlého měření určen náklon. Náklon je také číselně a graficky zobrazen spolu s naměřenou hodnotou

Pokud je třeba změřit sílu signálu, zmačkneme tlačítko „Měření“. Tím se zastaví posílání povelů pro robota, robot se zastaví, ovládání robota se obnoví po měření. Program měří asi 15 sekund, po tuto dobu se pošle 5000znaků z ATmega8 do počítače, kde se kontroluje správnost a počet přijatých znaků. Na obrazovce se zobrazují vadné přenosy, spočítaná síla signálu s počtem chyb a stav měření.

Jelikož je robot určen pro testování různých modulů, je možné nastavovat periodu, jakou se budou příkazy robotu posílat. Posílání a příjem dat je závislé na rychlosti modulů s jakou se dokáží přepínat mezi vysíláním a příjmem.



Obrázek 38 – Ovládací program pro robota

Pro komunikaci mezi PC a robotem byla vytvořena sada formátu zpráv (tabulka č.18) , která se kontroluje a případně vyhodnocuje na obou stranách. Při snaze o co nejmenší přenášený objem dat, byly voleny jednoduché formáty zpráv při obou směrech přenosu.

Povely PC -> Robot		
Formát zprávy	Data pro	Vysvětlivky
p1/x	Rychlost pohybu vpřed/vzad	x - počet milisekund převedený na char
p2/x	Velikost natočení předních kol	x - počet milisekund převedený na char
p3/x	Změna rozsahu SRF10	x - velikost rozsahu převedena na char
p4/x	Změna zesílení SRF10	x - velikost zesílení převedena na char
p5/x	Spuštění měření síly signálu	x - znak pro spuštění měření

Tabulka 18 – Formáty zpráv pro ovládání robota

Povely Robot -> PC		
Formát zprávy	Data ze snímače	Vysvětlivky
V1/xy	SRF10 č.1	x = vzdálenost nižší byte, převedena na char (0-255)
		y = vzdálenost vyšší byte, převedena na char (0-255)
V2/xy	SRF10 č.2	x = vzdálenost nižší byte, převedena na char (0-255)
		y = vzdálenost vyšší byte, převedena na char (0-255)
V3/xy	SRF10 č.3	x = vzdálenost nižší byte, převedena na char (0-255)
		y = vzdálenost vyšší byte, převedena na char (0-255)
V4/xy	SRF10 č.4	x = vzdálenost nižší byte, převedena na char (0-255)
		y = vzdálenost vyšší byte, převedena na char (0-255)
V5/xy	SRF10 č.5	x = vzdálenost nižší byte, převedena na char (0-255)
		y = vzdálenost vyšší byte, převedena na char (0-255)
V6/xy	SRF10 č.6	x = vzdálenost nižší byte, převedena na char (0-255)
		y = vzdálenost vyšší byte, převedena na char (0-255)
C1/x	CMPS03	x - velikost natočení převedeno na char (0-255)
GX/xxxx	ACC7260 osa X	xxxx - hodnota naměřeného napětí posílaná jako char (např. "1.77")
GY/xxxx	ACC7260 osa Y	xxxx - hodnota naměřeného napětí posílaná jako char (např. "1.77")

Tabulka 19 – Formát zpráv pro získání naměřených dat

6.2.1 Stručný popis zdrojového kódu uživatelského programu

Celý uživatelský program je psaný v programu C++ Builder 2007. Aplikace C++ Builder je integrované vývojové prostředí „IDE“ typu RAD (Rapid application development) umožňující rychlý vývoj aplikací. Grafické prvky umožňuje vyvíjet způsobem „drag-and-drop“, kombinuje VCL (Visual Component Library) a IDE. Projekt aplikace pro řízení robota je typu VLC Forms Application.

C++ Builder 2007 se po založení projektu stará o správu knihoven a vlastního hlavičkového souboru. Byl začleněn hlavičkový soubor pro sériovou komunikaci, tento program nabízí Builder ve svých pomocných podprogramech pro ovládání různých periférií. Dále musela být deklarována knihovna pro matematické výpočty.

Builder je vývojové grafické událostmi řízené prostředí, stačí pouze správný výběr a umístění komponenty a zvolení události, na kterou chceme reagovat. Builder pak sám začlení do zdrojového textu funkci, do které napíšeme náš zdrojový kód.

Události:

`void SerialEventManager(uint32 object, uint32 event)` - program zpracovává data přijaté ze sériové linky, pokud je nějaký požadavek, je vyvolána událost. Události `SERIAL_CONNECTED`, `SERIAL_DISCONNECT` a `SERIAL_DATA_SEND` vypíší na obrazovku stav, zda je sériový port připojen, odpojen a zda poslal nějaká data. Událost `SERIAL_DATA_ARRIVAL` přijme zprávu ze sériové linky a uloží do bufferu.

Dekódování je prováděno ve dvou režimech, buď se dekóduje zpráva ze snímačů pomocí tlačítka BtnPrijato, nebo správnost přijatých dat při měření komunikačních modulů, to aktivuje Timer 5. Který režim je kdy zapnutý bude vysvětleno dále.

`void __fastcall TFmain::Timer1Timer(TObject *Sender)` – časovač 1 posílá po sériové komunikaci příkazy o zatočení a rychlosti robota ve zvoleném intervalu. Volba intervalu se provádí pomocí komponenty ScrollBar1 v rozmezí 10ms až 2000ms.

`void __fastcall TFmain::Timer2Timer(TObject *Sender)` – časovač 2 vykresluje každých 50ms na obrazovku polohu joysticku a také vzdálenosti ze snímačů jako zelené trojúhelníky. Pokud je naměřená vzdálenost vyšší jak 200cm, trojúhelník se již nezvětšuje.

`void __fastcall TFmain::LConnectClick(TObject *Sender)` – tlačítko Connect zahajuje připojení k sériové lince na COM7 s nastavenou rychlostí 9600 bit/s, 8 datových bitů, žádnou paritou.

`void __fastcall TFmain::LDisconnectClick(TObject *Sender)` – tlačítko Disconnect ukončí probíhající připojení k sériové lince.

`void __fastcall TFmain::BtnKonecClick(TObject *Sender)` – tlačítko pro ukončení aplikace

`void __fastcall TFmain::BtnPrijatoClick(TObject *Sender)` – tlačítko Přijato, je voláno při přijetí zprávy ze sériové linky. Dekóduje přijatou zprávu, rozděljuje ji na hodnoty naměřenými jednotlivými snímači (data ve formátu viz. tabulka č.19). Rozluštěné zprávy číselně a graficky zobrazuje na obrazovku. Data z ultrazvukových dálkoměrů zobrazuje číselně. Azimut naměřený kompasem se převádí z rozsahu char 0-255 na 0-360°, zobrazuje číselně a graficky natočením šipky na obrázku kompasu do osmi poloh. Naměřené napětí na výstupech akcelerometru je převedeno na hodnotu náklonu robota, to je číselně i grafiky zobrazeno.

`void __fastcall TFmain::BtnSendRClick(TObject *Sender)` – tlačítko Rozsah mění parametr ultrazvukového dálkoměru SRF10, nová hodnota musí být zapsána do komponenty Edit. Po sériové lince je ihned změna odeslána do robota.

`void __fastcall TFmain::BtnSendZClick(TObject *Sender)` - tlačítko Zesílení mění obdobně parametr ultrazvukového dálkoměru SRF10, nová hodnota musí být zapsána do komponenty Edit. Po sériové lince je ihned změna odeslána do robota. Obě tlačítka Rozsah a Zesílení byly využívány při testech ultrazvukových snímačů, ale bylo zjištěno že nejlepších charakteristik pro naše využití dosahuje při defaultních hodnotách.

`void __fastcall TFmain::Timer3Timer(TObject *Sender)` – časovač 3, každých 50ms kontroluje stav joysticku a podle jeho polohy určuje délku pulzu PWM pro servomotor a regulátor otáček. Pro servomotor je délka pulzů přepočítána z polohy joysticku na ose X. Délka pulzu pro regulátor otáček je dána polohou joysticku na ose Y a také regulační pákou tedy osou Z. Pro kontrolu jsou vypočítané hodnoty zobrazeny na obrazovku.

`void __fastcall TFmain::ScrollBar1Change(TObject *Sender)` – událost, která se provede pokud na ScrollBaru1 provedeme změnu. Provede změnu časového intervalu Timeru 1 a vypíše novou nastavenou hodnotu na obrazovku

`void __fastcall TFmain::FormCreate(TObject *Sender)` – událost generovaná při spuštění aplikace, vypíše na obrazovku aktuální hodnotu intervalu Timeru 1 a také zapne funkci `DoubleBuffered`, která zabrání problikávání grafických komponent při změně.

`void __fastcall TFmain::BMereniClick(TObject *Sender)` – tlačítko Spustit měření, které zastaví časovač 1 (posílání povelů) a spustí časovač 5, ten zahájí měření.

`void __fastcall TFmain::Timer6Timer(TObject *Sender)` – časovač 6, zahájí měření a odesílá příkaz o zahájení měření do robota po sériové lince. Časovač je použit pro to, aby zde bylo zpoždění 1s, které dává možnost odvysílání zpráv ze strany robota, které byly ještě vyžádány.

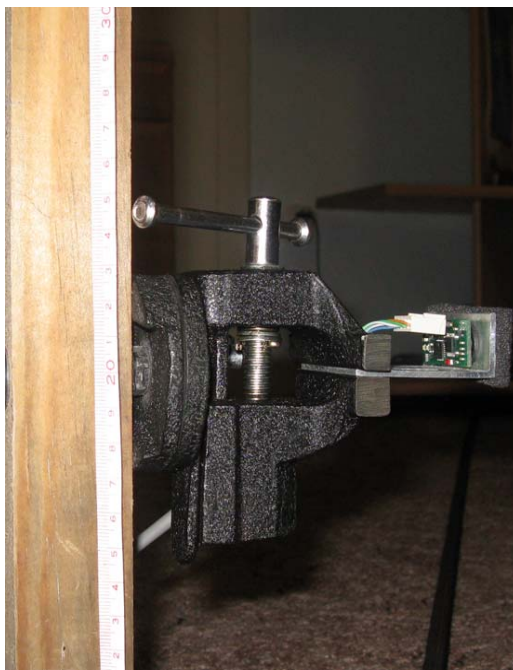
`void __fastcall TFmain::Timer5Timer(TObject *Sender)` – po dobu 15 sekund přijímá data z robota a následně porovná, zda data došla ve správném pořadí a se správnou hodnotou. Nakonec vyhodnotí velikost signálu a počet chyb. Chybná data vykreslí do grafu na obrazovku.

6.3 Měření charakteristik snímačů

Pro zjištění vlastností a možnosti využití zvolených snímačů bylo nutné proměřit jejich charakteristiky, tedy jak hodnoty od výrobce souhlasí s reálnými výsledky měření.

6.3.1 Charakteristika ultrazvukového dálkoměru SRF10

Snímač byl umístěn do gumových kroužků v hliníkovém držáku, ten byl upevněn v malém svěráku. Kolem aktivní části snímače je nalepena pěna, aby tlumila falešné odrazy. Svěrák bylo možno svisle posouvat po tyči, aby bylo možné změřit charakteristiku v různých výškách nad zemí.



Obrázek 39 – umístění snímače SRF10 pro měření

Měření bylo prováděno v místnosti 5x5m s kobercem, který mohl tlumit ultrazvuk a tedy pomáhal k tomu, aby nedocházelo k falešným odrazům. Teplota v místnosti byla 22°C.

Při prvním měření byla měřena přesnost, s jakou ultrazvukový snímač určuje polohu předmětu před sebou. Jako předmět byla kartónová krabice 280x280x350 mm. Tato krabice byla umístěna postupně v úhlech 60°, 30°, 0°, -30°, -60°. Z tabulek je vidět, že hodnoty ve výšce snímače 10cm a 20cm nad zemí (to je i výška uložení snímače na robotu) jsou velmi podobné, snímač v obou případech není uložen výš než je výška překážky. Nejbližší stěna překážky je umístěna tak, aby byla kolmá na snímač, tedy odráží ultrazvukové vlny zpět přímou cestou k snímači. Ve výšce 50cm a 100cm musela být dopočítaná vzdálenost mezi snímačem a horní hranou překážky. Překážka již neměla stěnu kolmou na směr zdroje ultrazvukového signálu. Zde se začalo projevovat „přehlížení“ překážky snímačem, kdy byl předmět umístěn pod ním, tedy buď byl mimo jeho vyzařovací úhel, nebo se ultrazvukový signál odrazil někam jinam a nemohla být tedy změřena vzdálenost. V tabulkách jsou nesmyslné hodnoty vyznačeny šedou barvou a nezměřené hodnoty jsou vyznačeny pomlčkou „-“. Tyto nezměřené hodnoty nebyly změřeny z důvodu, že zde byla překážka, která však nebyla snímačem detekována, ale měření zde nemohlo být provedeno.

Snímač 10cm nad zemí					
Vzdálenost	0°	30°	60°	-30°	-60°
6	8	21	40	34	67
10	13	26	26	13	73
20	20	21	19	21	24
30	29	30	33	31	32
50	47	49	52	48	50
80	78	79	81	78	80
100	97	99	101	98	100
150	148	149	150	150	150
200	198	199	202	200	-
250	249	250	252	249	-
270	268	268	266	269	-

Tabulka 20 – Data naměřená snímačem uloženým 10cm nad zemí

Snímač 20cm nad zemí					
Vzdálenost	0°	30°	60°	-30°	-60°
6	8	36	42	35	57
10	13	13	40	42	43
20	20	21	24	21	26
30	28	30	32	30	30
50	47	49	51	49	52
80	77	78	80	78	80
100	100	99	100	99	100
150	147	149	150	148	151
200	198	199	201	198	-
250	248	249	251	248	-
270	268	268	266	266	-

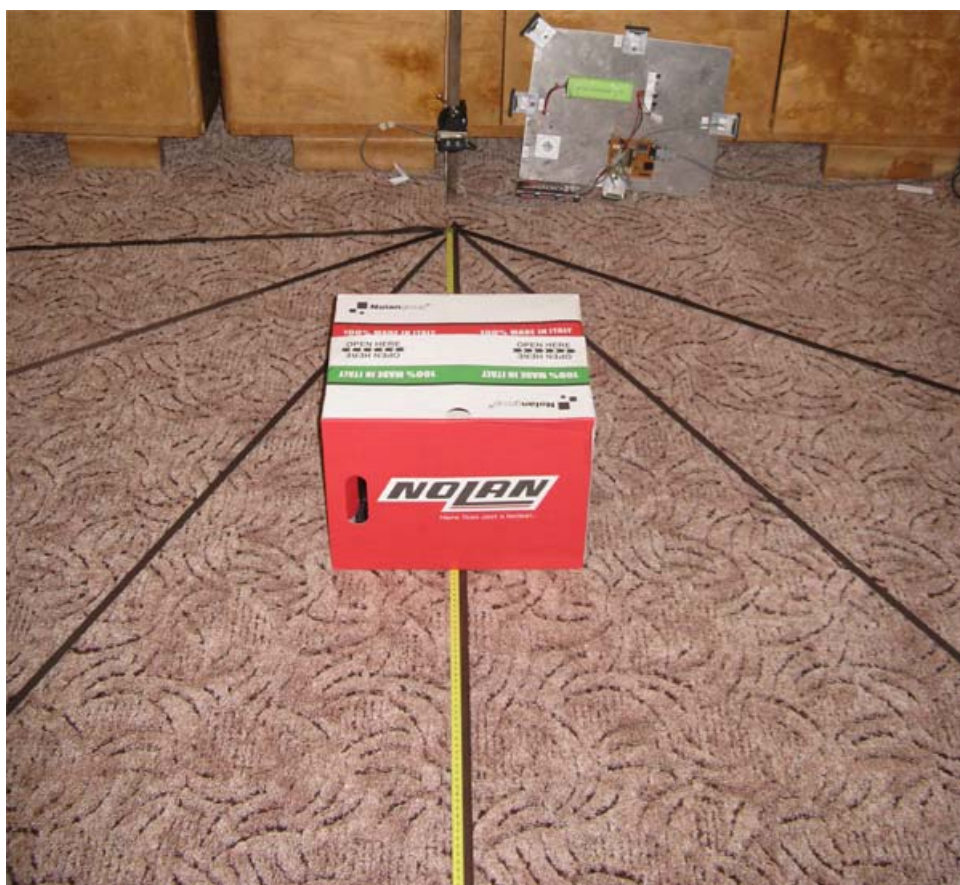
Tabulka 21 – Data naměřená snímačem uloženým 20cm nad zemí (výška na robotu)

Snímač 50cm nad zemí						
Vodorovná vzdálenost	Vzdálenost snímače od překážky (výška překážky 28cm)	0°	30°	60°	-30°	-60°
6	32,6	40	48	53	268	37
10	33,5	36	75	268	267	39
20	37,7	47	58	268	52	53
30	43,9	40	60	268	61	44
50	59,4	55	55	268	54	268
80	86,2	82	102	99	93	268
100	105,0	103	138	114	110	268
150	153,4	156	136	160	156	136
200	202,5	135	138	206	205	-
250	252,0	139	138	137	254	-
270	271,9	139	138	138	270	-

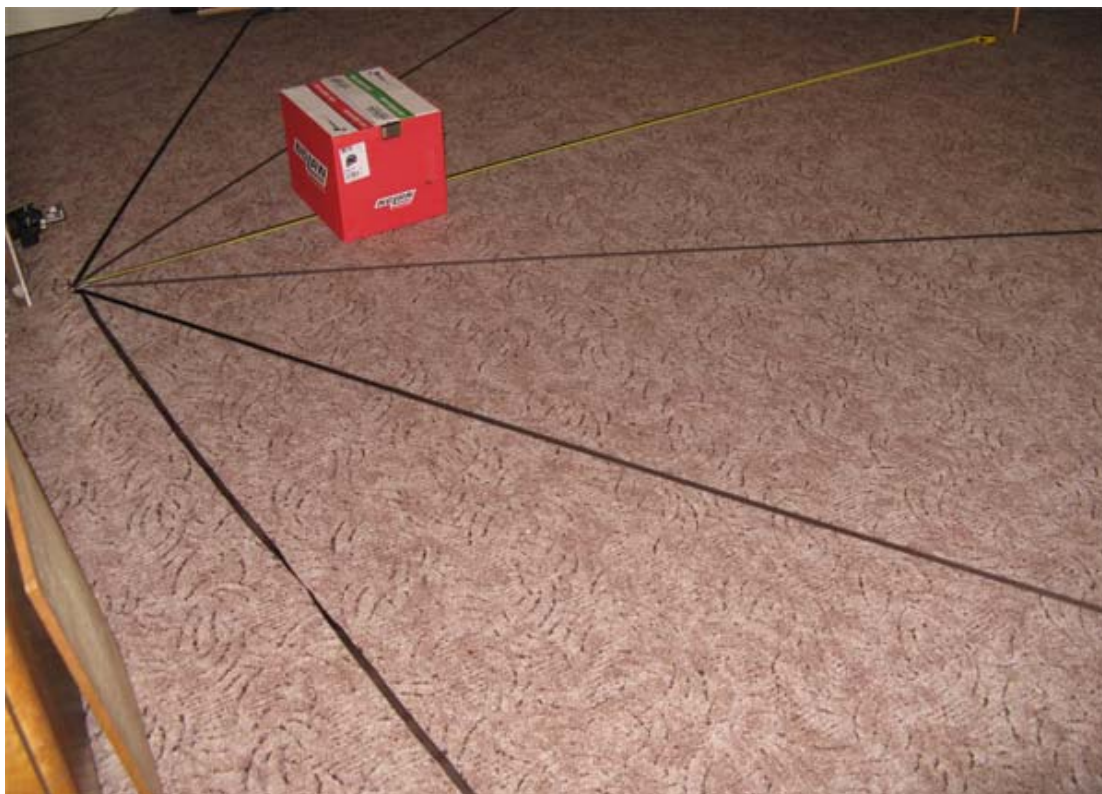
Tabulka 22 – Data naměřená snímačem uloženým 50cm nad zemí

Snímač 100cm nad zemí		
Vodorovná vzdálenost	Vzdálenost snímače od překážky (výška překážky 28cm)	0°
6	72,2	179
10	72,7	179
20	74,7	179
30	78,0	179
50	87,7	179
80	107,6	179
100	123,2	140
150	166,4	177
200	212,6	180
250	260,2	178
270	279,4	178

Tabulka 23 – Data naměřená snímačem 100cm nad zemí



Obrázek 40 – Měření charakteristiky ultrazvukového dálkoměru SRF10



Obrázek 41 - Měření charakteristiky ultrazvukového dálkoměru SRF10

Ve druhém měření byly před snímač v různých vzdálenostech pokládány předměty (obrázek č.42), aby se zjistilo jak velké předměty a v jaké vzdálenosti dokáže detekovat. Snímač byl ve stejné výšce, v jaké je umístěn na robotu, tedy 20cm nad zemí. Ukázalo se, že snímač dokáže detekovat od velkých předmětů (krabice) až po velmi malé (vršek od lepidla), ale čím menší předmět byl, tím se zužoval rozsah vzdáleností, kde byl předmět detekován. Při umístění malého předmětu před snímač byl „přehlížen“ a naopak při velké vzdálenosti nebyl „viděn“ (tabulka č.24).

Snímač 20cm nad zemí - různé předměty							
Vzdálenost	Rozměr předmětu Š x V x D						
	280x280x350	95x215x320	60x145x75	Ø50x50	Ø 15x70	Ø 14x49	Ø 15x15
6	8	17	268	267	267	267	267
10	13	13	35	267	267	267	267
20	20	21	30	30	267	267	267
30	28	31	31	36	36	36	39
50	47	48	49	54	53	54	53
80	77	78	78	81	82	82	83
100	100	98	99	101	102	103	104
150	147	149	151	152	268	153	267
200	198	200	200	268	268	267	267
250	248	249	250	267	268	267	267
270	268	267	267	267	268	267	267

Tabulka 24 – Data naměřená při různých velikostech detekovaného předmětu

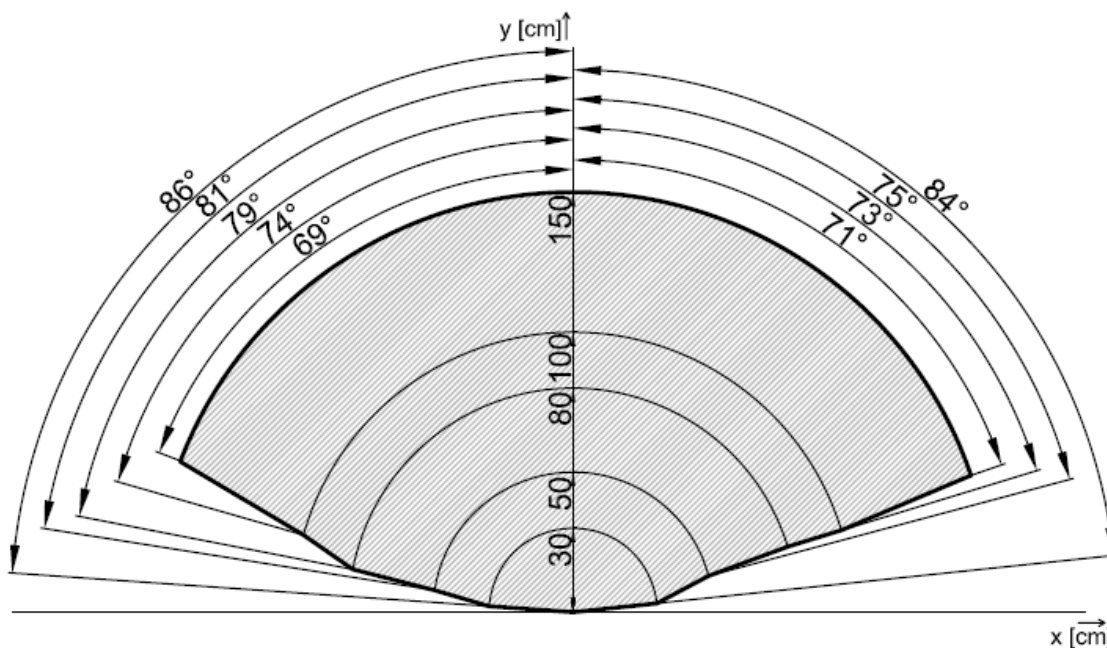


Obrázek 42 – Všechny předměty, které byly testovány při měření se SRF10

V posledním měření se SRF10 byla měřena vyzařovací charakteristika. Překážka byla posouvána a natáčena tak, aby byl docílen co největší možný úhel v různých vzdálenostech od snímače. V tabulce č.25 jsou zapsány a na obrázku č.43 jsou znázorněny stupně a vzdálenosti od snímače. Měření bylo provedeno pouze do vzdálenosti 150cm, protože ve větší vzdálenosti již byla na levé straně překážka, která sice nebyla detekována při výšce snímače 20cm nad zemí, ale pro měření byla omezující.

Vzdálenost [cm]	Minimální úhel [°]	Maximální úhel [°]
30	-86°	84°
50	-81°	75°
80	-79°	73°
100	-74°	73°
150	-69°	71°

Tabulka 25 - Vyzařovací charakteristika snímače SRF10 (měřeno do 150cm)



Obrázek 43 – Vyzařovací charakteristika snímače SRF10 (měřeno do 150cm)

6.3.2 Charakteristika magnetometru CMPS03

Kompas byl umístěn na hliníkovou konzolu vysokou 50cm, aby snímač nebyl ovlivněn magnetickým materiálem pod ním. Pro možnost přesného natočení byl použit otočný stůl Optimum. Aby snímač byl ovlivněn co nejméně, otočný stůl byl položen a přichycen na hliníkové desce (obrázek č.44). Měření proběhlo v místnosti při okolní teplotě 22 °C. Místo uložení snímače bylo vodorovně vyváženo. Napájení a datový kabel ke snímači měl délku 1 metr, aby ovládací deska mohla být v dostatečné vzdálenosti od snímače.

Na začátku měření byl snímač natočen tak, aby ukazoval azimut 0°. CMPS03 má udávanou přesnost po kalibraci 3-4°. Kompas byl natáčen po pěti stupních a hodnota azimutu zapisována. Data z prvního měření ukázala značnou odchylku od skutečných hodnot (někde i 12°). Proto byl kompas kalibrován a měření proběhlo znovu, velikost odchylek se zmenšila. V místech 0°, 90°, 180° a 270° byla dokonce odchylka nulová, největší odchylka byla naměřena 6°. Pro jistotu změřených údajů, že kompas CMPS03 není ovlivněn nějakým magnetickým materiálem z okolí měření, byl na konzolu upevněn obyčejný vojenský kompas (obrázek č.44), který po natáčení po pěti stupních vždy ukazoval očekávanou hodnotu.

Měření č.1			
Nastavení stupňů na otočném stole [°]	Očekávaný Azimut [°]	Změřený Azimut [°]	Odchylka [°]
126	0	0	0
131	5	4	1
136	10	8	2
141	15	14	1
146	20	18	2
151	25	22	3
156	30	26	4
161	35	31	4
166	40	36	4
171	45	40	5
176	50	45	5
181	55	49	6
186	60	54	6
191	65	59	6
196	70	63	7
201	75	69	6
206	80	74	6
211	85	78	7
216	90	83	7
221	95	88	7
226	100	93	7
231	105	97	8
236	110	101	9
241	115	105	10
246	120	111	9
251	125	115	10
256	130	119	11
261	135	125	10
266	140	129	11
271	145	133	12
276	150	139	11
281	155	143	12
286	160	149	11
291	165	155	10
296	170	160	10
301	175	164	11
306	180	170	10

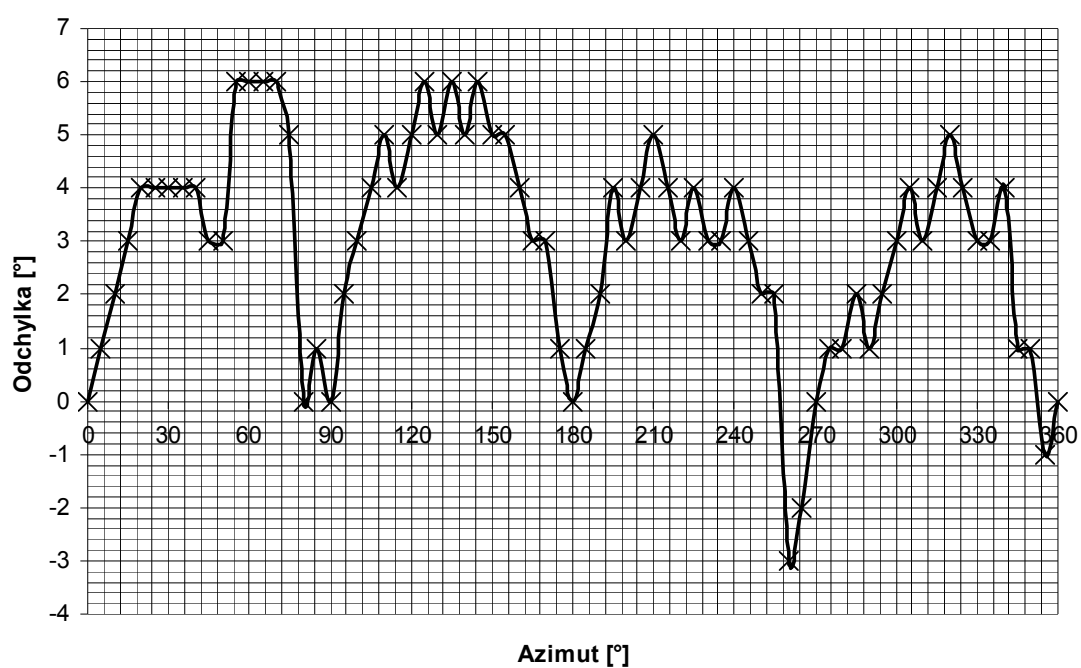
Měření č.1			
Nastavení stupňů na otočném stole [°]	Očekávaný Azimut [°]	Změřený Azimut [°]	Odchylka [°]
311	185	176	9
316	190	181	9
321	195	186	9
326	200	190	10
331	205	195	10
336	210	200	10
341	215	204	11
346	220	210	10
351	225	214	11
356	230	219	11
1	235	225	10
6	240	231	9
11	245	236	9
16	250	241	9
21	255	246	9
26	260	252	8
31	265	258	7
36	270	265	5
41	275	270	5
46	280	274	6
51	285	280	5
56	290	286	4
61	295	290	5
66	300	296	4
71	305	301	4
76	310	307	3
81	315	311	4
86	320	317	3
91	325	322	3
96	330	327	3
101	335	332	3
106	340	338	2
111	345	344	1
116	350	349	1
121	355	355	0
126	0	0	0

Tabulka 26 – Měření charakteristiky CMPS03 bez kalibrace

Měření č.2 - po kalibraci			
Nastavení stupňů na otočném stole [°]	Očekávaný Azimut [°]	Změřený Azimut [°]	Odchylka [°]
130	0	0	0
135	5	4	1
140	10	8	2
145	15	12	3
150	20	16	4
155	25	21	4
160	30	26	4
165	35	31	4
170	40	36	4
175	45	42	3
180	50	47	3
185	55	49	6
190	60	54	6
195	65	59	6
200	70	64	6
205	75	70	5
210	80	80	0
215	85	84	1
220	90	88	0
225	95	93	2
230	100	97	3
235	105	101	4
240	110	105	5
245	115	111	4
250	120	115	5
255	125	119	6
260	130	125	5
265	135	129	6
270	140	135	5
275	145	139	6
280	150	145	5
285	155	150	5
290	160	156	4
295	165	162	3
300	170	167	3
305	175	174	1
310	180	180	0

Měření č.2 - po kalibraci			
Nastavení stupňů na otočném stole [°]	Očekávaný Azimut [°]	Změřený Azimut [°]	Odchylka [°]
315	185	184	1
320	190	188	2
325	195	191	4
330	200	197	3
335	205	201	4
340	210	205	5
345	215	211	4
350	220	217	3
355	225	221	4
0	230	227	3
5	235	232	3
10	240	236	4
15	245	242	3
20	250	248	2
25	255	253	2
30	260	263	3
35	265	267	2
40	270	270	0
45	275	274	1
50	280	279	1
55	285	283	2
60	290	289	1
65	295	293	2
70	300	297	3
75	305	301	4
80	310	307	3
85	315	311	4
90	320	315	5
95	325	321	4
100	330	327	3
105	335	332	3
110	340	336	4
115	345	344	1
120	350	349	1
125	355	356	1
130	0	0	0

Tabulka 27 – Měření charakteristiky CMPS03 po kalibraci



Graf 1– Velikosti odchylky azimutu od skutečné hodnoty



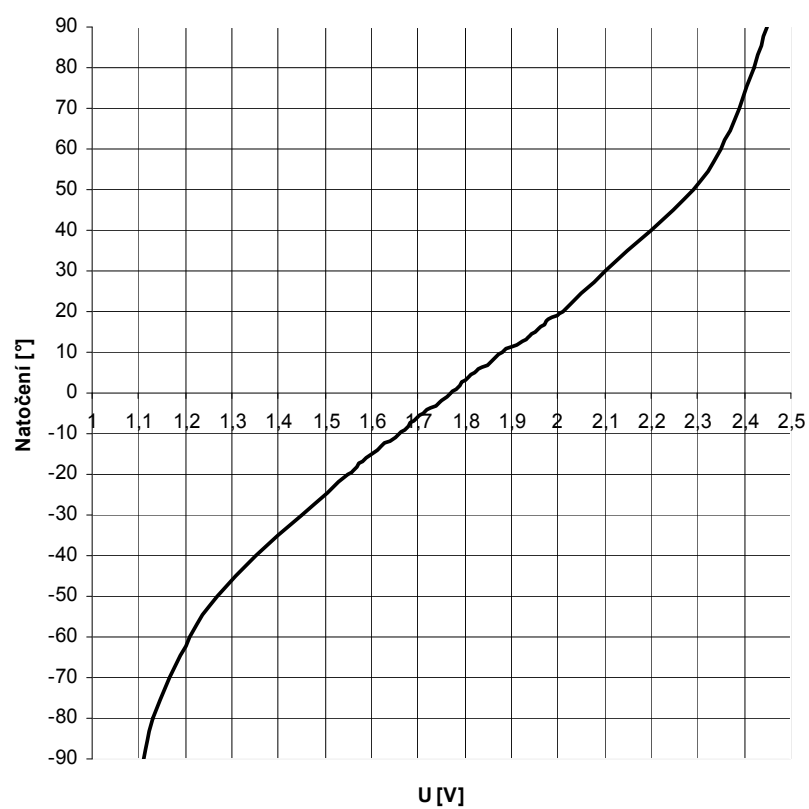
Obrázek 44 – Měření charakteristiky CMPS03 a zkouška prostředí měření

6.3.3 Charakteristika akcelerometru ACC7260

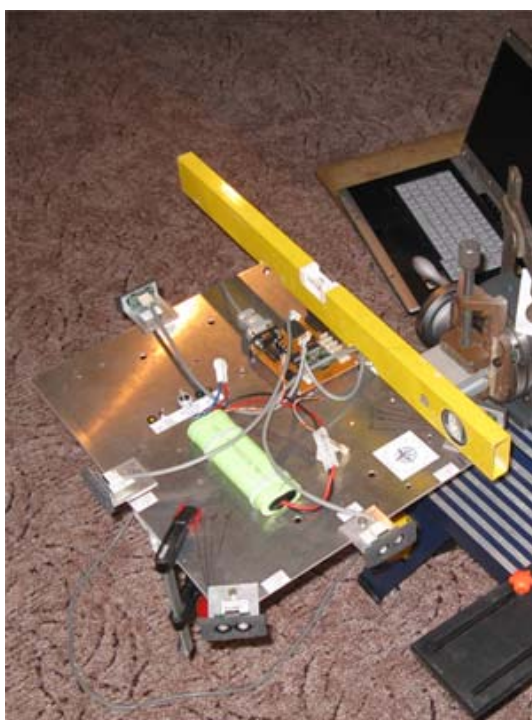
Akcelerometr ACC7260 byl umístěn na vrchní hliníkové desce robota, která byla upevněna k otočnému stolu Optimum pro možnost natáčení. Snímač byl uveden do vodorovné polohy a postupně natáčen do stran. Natočení probíhalo v rozmezí od -20° do 20° po jednom stupni, protože se předpokládá že v tomto rozmezí se bude robot nejčastěji pohybovat. Natočení dále proběhlo až do $\pm 90^\circ$. Akcelerometr byl proměřován jen v ose X. Z grafu je vidět že do náklonu $\pm 40^\circ$ se snímač chová téměř lineárně, to je využito v uživatelském programu, kde není nějak složitěji určován náklon, pouze se lineární rovnicí dopočítá.

Natočení [°]	Napětí [V]	Natočení [°]	Napětí [V]
0	1,77		
1	1,78	-1	1,76
2	1,79	-2	1,75
3	1,80	-3	1,74
4	1,81	-4	1,72
5	1,82	-5	1,71
6	1,83	-6	1,70
7	1,85	-7	1,69
8	1,86	-8	1,68
9	1,87	-9	1,67
10	1,88	-10	1,66
11	1,89	-11	1,65
12	1,91	-12	1,64
13	1,93	-13	1,62
14	1,94	-14	1,61
15	1,95	-15	1,60
16	1,96	-16	1,59
17	1,97	-17	1,58
18	1,98	-18	1,57
19	2,00	-19	1,56
20	2,01	-20	1,55
30	2,10	-30	1,45
40	2,20	-40	1,35
50	2,29	-50	1,27
60	2,35	-60	1,21
80	2,42	-80	1,13
90	2,45	-90	1,11

Tabulka 28 – Charakteristika akcelerometru ACC7260



Graf 2 – Charakteristika akcelerometru ACC7260

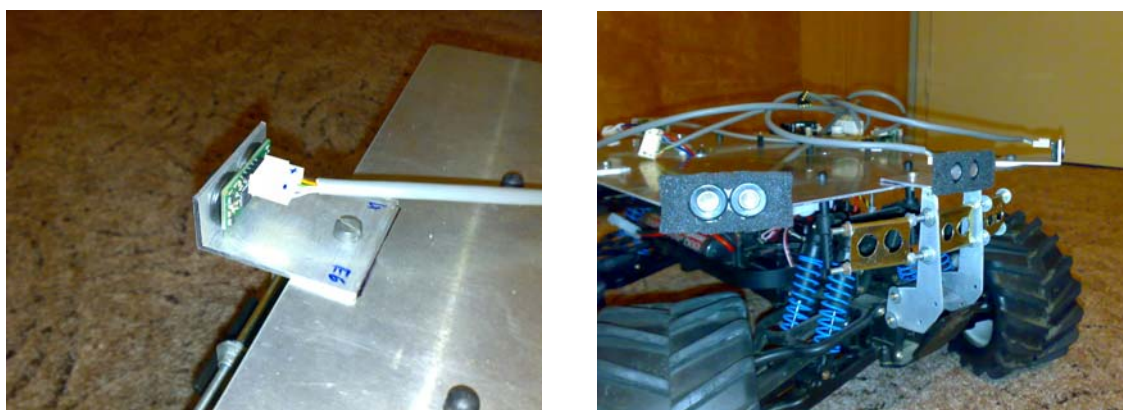


Obrázek 45 – Měření charakteristiky ACC7260

6.4 Návrh rozmístění snímačů SRF10

K orientaci robota v neznámém prostoru je využito 6 snímačů SRF10. Rozmístění je tři vpředu, jeden na každém boku a jeden vzadu. Krajní snímače v přední části robota jsou natočeny o 20° vlevo a o 20° vpravo pro lepší monitorování stavu před robotem.

Snímače jsou přes gumové kroužky připevněny na hliníkových konzolách s možností natáčení, které jsou umístěny tak aby snímače byly vystrčeny před robota pro správnou funkci. Výška uložení snímače je 20cm, na horní hliníkové desce. Robota je možné ovládat z nepohyblivé operátorské stanice. S výškou uložení snímače roste však stín před robotem, kde pak nemáme informaci o možných překážkách. Přesnost ultrazvukových snímačů je vysoká a odchylka měření je asi do 20mm.



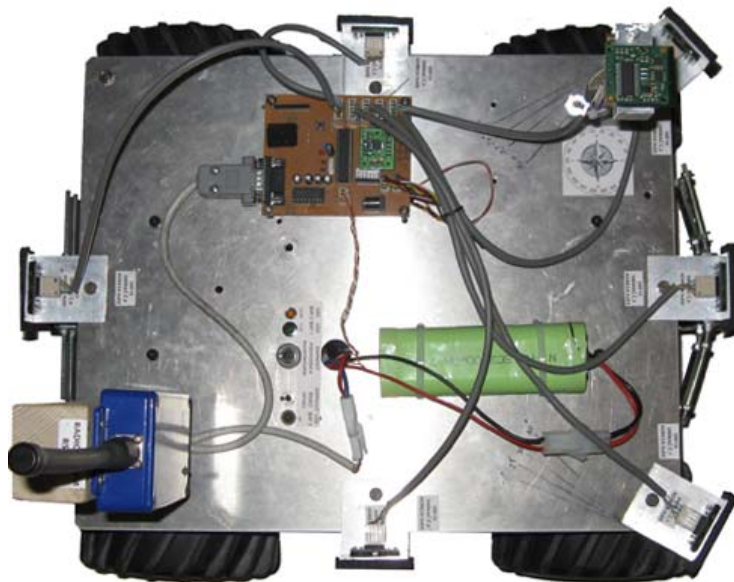
Obrázek 46 – Hliníková konzole pro uchycení SRF10 a umístění snímače tlumící pěnou

Pro falešné odrazy je kolem snímačů nalepena pěna, která pomohla ustálit získané, stále kmitající hodnoty. Další vylepšení získaných hodnot je použití napěťového stabilizátoru, protože snímač SRF10 je citlivý na napájecí napětí.

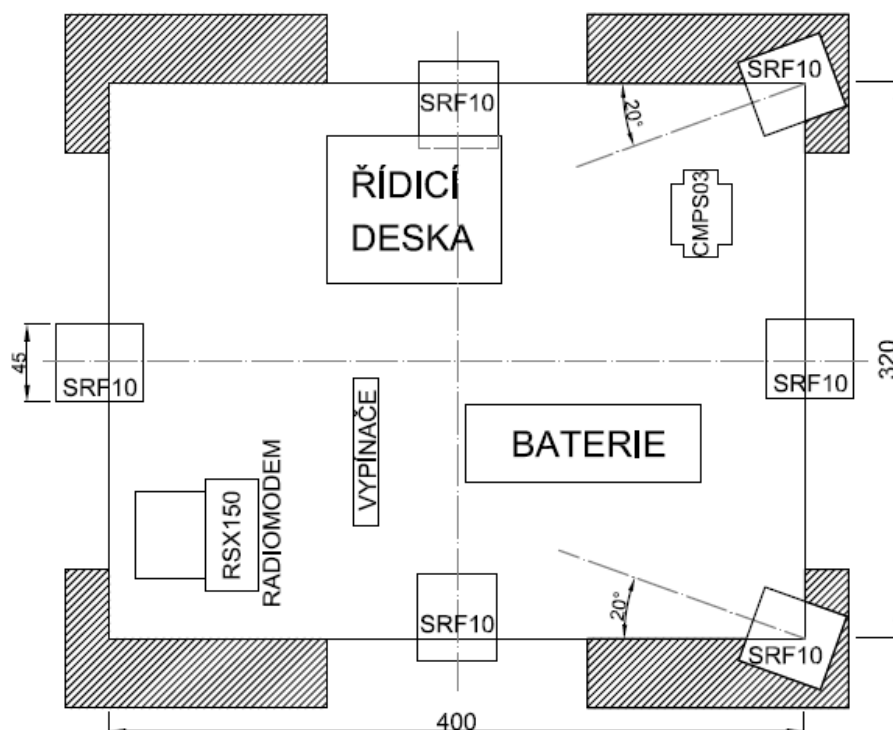
6.5 Podvozek

Na podvozku je připevněna hliníková deska, která slouží pro uchycení jednotlivých komponentů pro ovládání a senzorku robota. Na desce je umístěn vypínač a kontrolky pro indikaci zapnutí a zapojení baterií. Konektory na dvě baterie jsou zapojeny tak aby dávaly společně 14,4V pro radiomodem RSX150 a také napájení 7,2V pro regulátor otáček, který napětí stabilizuje na náhradních 5V pro řídicí elektroniku pro případ kdyby nebyla k dispozici třetí baterie. Třetí baterie zapojena přes stabilizátor L78S05 je zdrojem napětí pro řídicí elektroniku. Na hliníkovou desku jsou připevněny jednotlivé prvky jako plošné spoje, vypínač, kontrolky, radiomodem, senzory apod. Rozmístění komponentů na desce je navrženo tak, aby vše mělo kolem sebe dostatek místa pro připojovací kabely. Radiomodem a kompas jsou umístěny v protějších rozích, aby se co nejméně ovlivňovali. Kompas CMPS03 je umístěn na hliníkové tyči 180mm nad

deskou, aby nebyl ovlivňován magnetickým polem dvojicí stejnosměrných motorů. V rohu hliníkové desky je umístěn konektor pro nabíjení baterií.



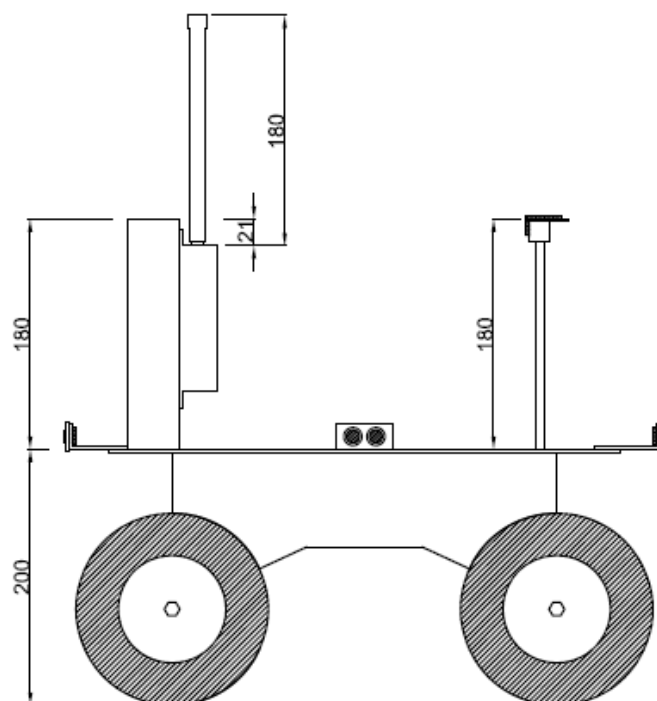
Obrázek 47 – Umístění komponentů na robotu



Obrázek 48 – Umístění komponentů na robotu - pohled zvrchu



Obrázek 49 – Umístění komponentů na robotu – pohled zprava

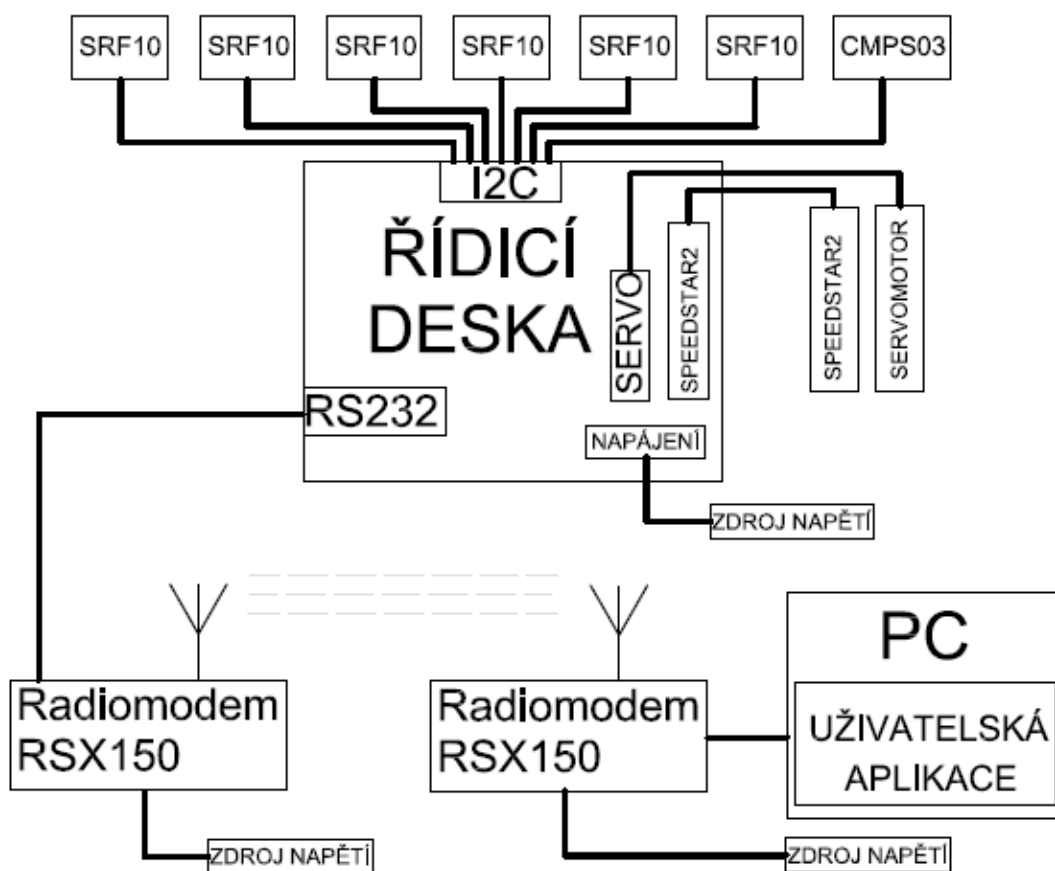


Obrázek 50 – Umístění komponentů na robotu – pohled zprava

6.6 Elektrické zapojení

Deska plošného spoje obsahuje veškerou elektroniku pro řízení připojených čidel a komunikace. Základním prvkem je mikrokontrolér ATmega8, k němu jsou připojeny komponenty pro ovládání všech funkcí robota.

6.6.1 Zjednodušené schéma zapojení řídicí desky a komponentů

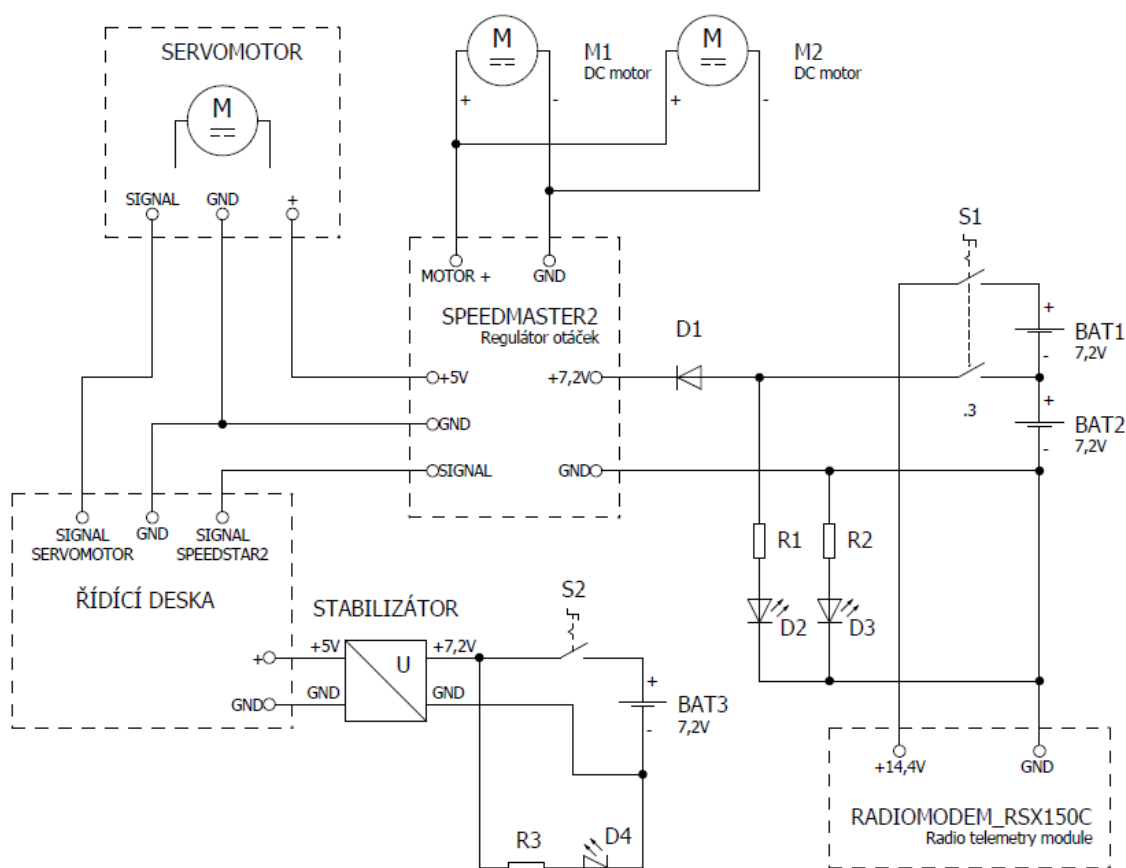


Obrázek 51 – Zjednodušené schéma zapojení řídicí desky a komponentů

6.6.2 Schéma zapojení podvozku robota

Zdroj napětí pro regulátor otáček stejnosměrných motorů je Baterie BAT2. Baterie BAT1 a BAT2 jsou zapojeny do série a společně dávají napětí 14,4V pro radiomodem RSX150C. Zapojená dioda D1 zabránuje přepólování, kdyby byla odpojena baterie BAT2. Vypínače S1 a S2 připojují baterie, LED diody D2, D3 a D4 signalizují připojené napětí na regulátor otáček, radiomodem a řídicí desku. Protože řídicí napětí

pro snímače, ATmega8 a MAX232 je 5V, je deska připojena na zdroj napětí přes stabilizátor 74S05, který stabilizuje vstupní napětí na 5V. Řídicí deska generuje signály PWM pro servomotor a regulátor otáček, ten vnitřním stabilizátorem dává také 5V a napájí servomotor. Napájení regulátoru otáček a řídicí desky je z jiných baterií z důvodu mírného poklesu napětí při zatížení regulátorem otáček nebo servomotorem, což zapříčinilo chybu AD převodníku na ATmega8, který přestal fungovat.



Obrázek 52 – Schéma zapojení podvozku

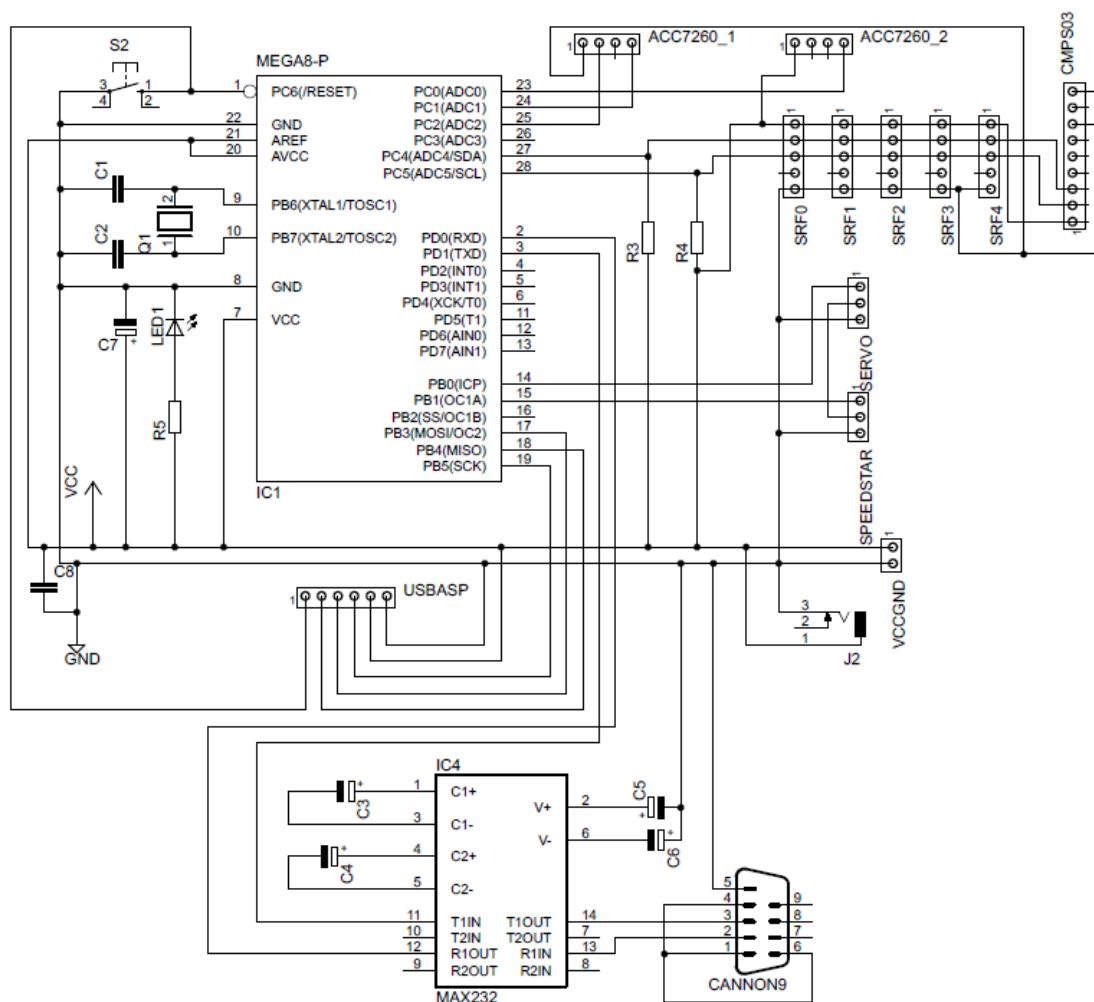
6.6.3 Schéma zapojení plošného spoje

ATmega8 pomocí svých výstupů ovládá regulátor otáček a servomotor pro natáčení kol. Pomocí sběrnice I2C (TWI) komunikuje s ultrazvukovým dálkoměrem SRF10 a magnetometrem CMPS03. Na I2C (TWI) sběrnici musí být připojeny pull-up rezistory, které zvedají napětí při klidu na 5V, tedy když není v činnosti žádné zařízení, stačí pouze tyto dva na celou sběrnici. Funkce AD převodníku je využita pro měření napětí z akcelerometru ACC7260. Výstupy USART Rx a Tx jsou připojeny na integrovaný obvod MAX232 a slouží pro sériovou komunikaci. MAX232 potřebuje pro svou správnou funkci čtyři elektrolytické kondenzátory.

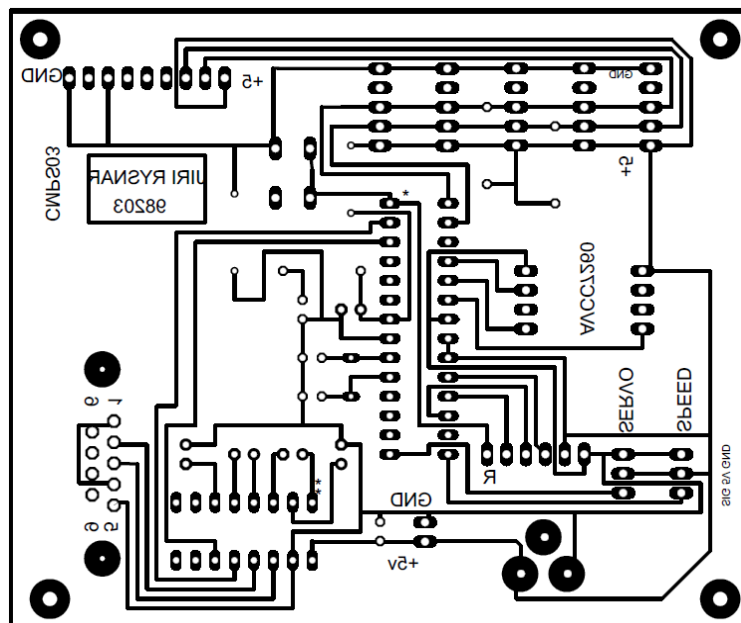
Pro restartování programu je na resetovací pin ATmega8 připojeno tlačítko. K mikrokontroléru je připojen vnější oscilátor - krystal 10MHz.

Na desce jsou patice pro připevnění integrovaných obvodů ATmega8 a MAX232, a také pro připojení ACC7260 a CMPS03. Kompas CMPS03 je zde připevněn ale pouze pro přepravu, protože zde je rušen magnetickým polem stejnosměrných motorů, nemůže tedy podávat pravdivou informaci.

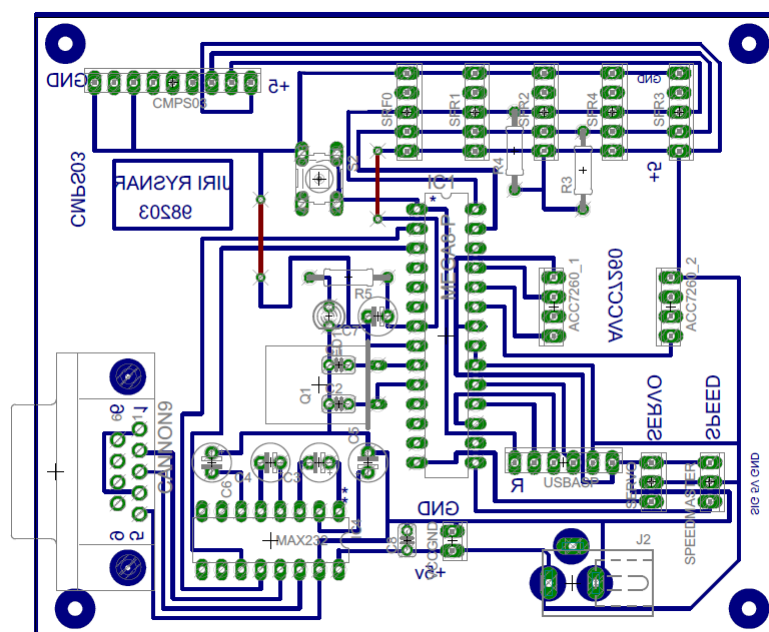
Konektory pro připojení jednotlivých snímačů, které jsou připojeny na sběrnici I2C (TWI) jsou umístěny na kraji řídicí desky. Dále je na této desce umístěn konektor CANNON9 pro sériovou komunikaci pomocí RS232, napájecí konektor, konektor pro připojení programátoru USBasp a konektory pro připojení servomotoru a regulátoru otáček. Napájení řídicí desky může být jak z adaptéru (Jack3,5) nebo z baterie (dvou pinový konektor). Přítomnost napájecího napětí je signalizována červenou LED diodou. Napájecí napětí je filtrováno elektrolytickým a keramickým kondenzátorem.



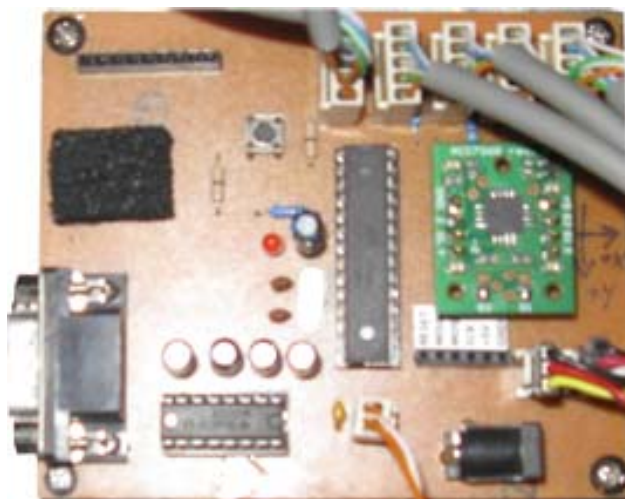
Obrázek 53 – Schéma zapojení



Obrázek 54 – Navržený plošný spoj



Obrázek 55 – Rozmístění součástek na plošném spoji



Obrázek 56 – Vyrobený a součástkami osazený plošný spoj

Označení	Význam	Hodnota
C1,C2	Kondenzátor keramický	22pF
C3, C4, C5, C6	Kondenzátor elektrolyt.	1 μ F/5V
C7	Kondenzátor elektrolyt.	200 μ F/5V
C8	Kondenzátor keramický	100nF
CANNON9	Konektor	CANNON9
CMPS03	Modul kompasu	CMPS03
IC1	Mikrokontrolér	ATmega8
IC4	Převodník	MAX232
LED1	LED dioda	3mm červená
Q1	Krystal	10MHz
R3,R4,	Odpor	1,5k Ω
R5	Odpor	1k Ω
S2	Tlačítko	P-B1720
Patice:	2ks 5pinů jednořadé	SIL05SPZ
	RM2.54	SOKL14
	RM2.54	DIL28PZ
Konektory:	2ks 3piny	PSH02-03P
	2ks 4piny	PSH02-04P
	1ks 6pinů	BL10G
	5ks 5pinů	PSH02-05P
	1ks 9pinů	BL10G
	Napájecí vidlice	K375A

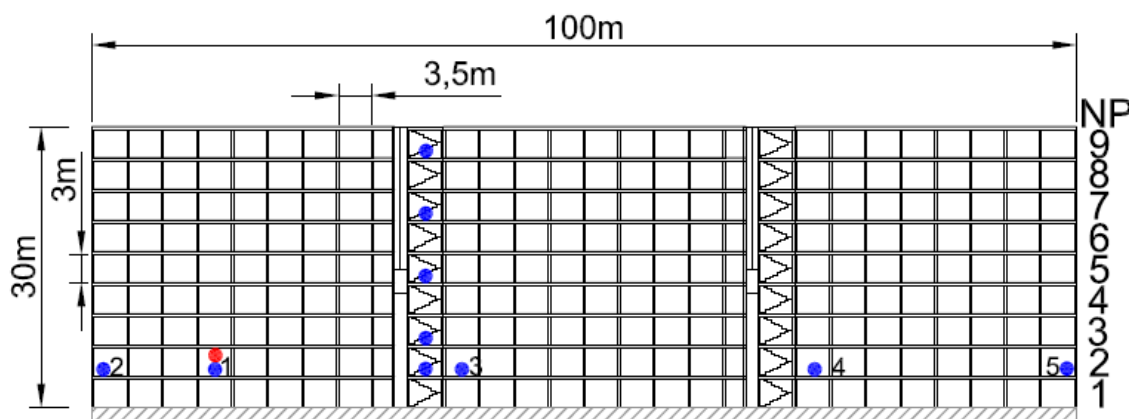
Tabulka 29 – Seznam použitých součástek na plošném spoji

6.7 Testování komunikačních modulů

Robot je určený pro testování komunikačních modulů. Testování komunikačních modulů bylo předmětem diplomové práce Davida Petrova - Komunikační systém malého mobilního robotu. Protože obě diplomové práce jsou úzce spojeny, jsou níže popsány výsledky měření signálu.

Robot může kdykoliv měřit sílu signálu, pokud dostane povel od obsluhy. Zkouška měření signálu na různých modulech probíhala v panelovém domě na chodbě a v různých podlažích. Na obrázku č.57 je červeně vyznačeno umístění jednoho komunikačního modulu v pokoji, s druhým komunikačním modulem probíhalo měření na místech vyznačených bodem s modrou barvou na chodbě budovy.

Modul Re400 při měření dosahoval nejlepších výsledků, jeho nastavená rychlost byla 112 kBd. Re400 má možnost přepínání dvou režimů výkonu, to se projevuje silou signálu na větší vzdálenostech – tabulka č.30. Z tabulek naměřených hodnot je vidět, že signál v panelovém domě, kde signál musel projít přes 9 nadzemních podlaží a zdi byl vysoký 72,22%. Modul RSX150 s rychlostí 9,6kBd postupně ztrácí signál už od třetího nadzemního podlaží v sedmém již má signál nulový. Bluetooth modul OMSPA310 má malý výkon, proto se ani neočekával velký dosah. Jeho rychlost je 57,6kBd. Signál byl změřena pouze v bodě č.1, dále již byl nulový.



Obrázek 57 – Místa měření síly signálu komunikačních modulů

Bod	Vzdálenost mezi komunikačními moduly [m]	Re400 Signál [%]		OMSPA310 Signál [%]	RSX150 Signál [%]
		Low 0,5W	High 2W	2,2 mW	500mW
1.	8	100	100	64	100
2.	12	100	100	0	100
3.	24	96,93	100	0	100
4.	63	78,65	100	0	0
5.	79	74,81	100	0	0

Tabulka 30 – Měření komunikačních modulů v 2.NP budovy

NP	Vzdálenost [m]	Re400, High signál [%]	RSX150, 0,5 W signál [%]
2.	23,1	100%	100%
3.	23,6	98,26	41%
5.	26,4	98,26	6%
7.	29,3	72,22	0
9.	32,8	72,22	0

Tabulka 31 – Měření komunikačních modulů v různých NP

Suma chyb: 3000 Bytů

Připojit

Měření

Odpojit

Signál: 94,7916 %

Obrázek 58 – Měření síly signálu – zobrazení na PC

7 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce byl návrh a realizace malého mobilního kolového robota, který se bude pohybovat v lehkém terénu a je určený pro testování komunikačních modulů

Terénní podvozek Traxxas je poháněn servomotorem pro zatáčení a stejnosměrnými motory pro pohyb. Otáčky stejnosměrných motorů pro pohyb vpřed a vzad jsou řízeny regulátorem otáček. Signálem PWM do servomotoru a regulátoru otáček se udává požadované natočení předních kol a rychlost pohybu.

Řízení, senzorický systém a komunikační modul je umístěno na desce uložené nad podvozkem. Pro orientaci robota v prostoru byly vybrány ultrazvukové dálkoměry SRF10 umístěné po obvodu robota. Tři ultrazvukové senzory vpředu dva na stranách a jeden v zadní části. Pro orientaci kterým směrem se robot pohybuje slouží magnetometr CMPS03, který podává informaci o azimutu. Jestli robot jede v terénu do kopce nebo z kopce a zda je nakloněn do boku snímá akcelerometr ACC7260. Na zvolených snímačích se měřením zjistily jejich skutečné charakteristiky.

Ovládání a řízení komunikace realizuje mikrokontrolér typu Atmel AVR ATmega8. Sériová komunikace mezi mikrokontrolérem a PC byla fyzicky realizována komunikačními moduly RSX150, RE400 a OEMSPA310. Komunikace se snímači SRF10 a CMPS03 probíhá přes I2C.

Uživatelský program vytvořený ve vývojovém prostředí C++ Builder 2007 posílá příkazy o pohybu do robota a zpracovává naměřená data posílána robotem. Naměřená data jsou graficky a číselně zobrazena na obrazovce PC pro snadnou orientaci obsluhy. Ovládání pohybu robota ze strany operátora je pomocí počítačového joysticku. Měření síly signálu může být zahájeno kdykoliv při pohybu robota.

Má diplomová práce Řídicí a senzorický systém malého průzkumného mobilního robota byla spojena s prací Komunikační systém malého mobilního robota vypracovanou Davidem Petrovem, kde se problematice komunikačních modulů věnuje hlouběji.

Byl navrhnut a realizován funkční celek. Robot byl odzkoušen v prostředí s různými překážkami, které byl schopný detekovat a operátor se jím mohl vyhnout. Na přiloženém CD je video s ukázkou pohybu robota po chodbě s překážkami a zobrazení přijatých dat na obrazovce PC.

8 SEZNAM LITERATURY

- [1] VÁŇA V. *Mikrokontroléry ATMELE AVR – popis procesorů a instrukční soubor*. BEN, Praha, 2003
- [2] ATMELE. *Datasheet ATmega8**. ATMELE Corporation., [online] (8.2.2010) http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2486.pdf
- [3] HOBBYROBOT. *SRF10 – Ultrasonic range finder*. Hobbyrobot, Praha [online] (8.3.2010) http://www.hobbyrobot.cz/PDF/SRF10_cz.pdf
- [4] BURIAN F. *Programátor USBasp*. VUT, Brno, 2010
- [5] JOSEPH J. JONES. *Mobile Robots – Inspiration to Implementation*, ISBN, 1999
- [6] HOBBYROBOT. *CMPS03 – Modul kompasu pro robotiku*. Hobbyrobot, Praha [online] (11.12.2010) http://www.hobbyrobot.cz/PDF/CMPS03_cz.pdf
- [7] SNAIL INSTRUMENTS. *ACC7260 – Modul tříosého akcelerometru*. SNAIL INSTRUMENTS, Beroun, [online] (11.12.2010) <http://shop.snailinstruments.com/docs/acc7260.pdf>
- [8] KADLEC VÁCLAV. *Učíme se programovat v Borland C++ Builder a jazyce C++*, BEN, 2002
- [9] MATOUŠEK DAVID. *C++ Builder 4.0, 5.0 a 6.0 – vývojové prostředí, 1-3 díl*, BEN, 2003
- [10] WOOD&DOUGLAS. *RSX range of intelligent modems -User guide*. WOOD&DOUGLAS Corporation, [online] (10.1.2011) http://www.woodanddouglas.co.uk/files/telemetry/radio_modems/RSX450/18921139.pdf
- [11] RACOM. *Narrowband radio modem ECONOMY RE400*. RACOM Corporation, [online] (10.1.2011) http://www.radioterminal.ru/upl_instructions/racom_re400-m-en.pdf
- [12] CONNECTBLUE. *OEM Serial port adapter*. CONNECTBLUE corporation, [online] http://www.spezial.cz/pdf/em_ds_oemspa_310.pdf

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obrázek 1 – Rozměry modelu auta
Obrázek 2 – Rozmístění komponentů na podvozku Traxxas
Obrázek 3 – Podvozek Traxxas
Obrázek 4 – Připojení ultrazvukového dálkoměru SRF10 [3]
Obrázek 5 – SRF10 vyzařovací charakteristika [3]
Obrázek 6 – Zapojení CMPS03 [6]
Obrázek 7 – Rozměrový náčrtek CMPS03 [6]
Obrázek 8 – Vývody ACC7260 [7]
Obrázek 9 – vnitřní zapojení modulu ACC7260 [7]
Obrázek 10 – Popis pinů ATmega8 [1]
Obrázek 11 – TCCR0 (Timer/Counter0 Control Register)[1]
Obrázek 12 - Zapojení zařízení a pull-up rezistorů [2]
Obrázek 13 – Platnost dat [2]
Obrázek 14 – STAR a STOP bity [2]
Obrázek 15 – Přenos adresového paketu [2]
Obrázek 16 – Přenos datového paketu [2]
Obrázek 17 – Přehled jednotlivých částí a jejich propojení [2]
Obrázek 18– Registr TWBR (rychlost SCL) [2]
Obrázek 19 – Registr TWSR (registr stavu) [2]
Obrázek 20 – Registr TWCR (řídící registr) [2]
Obrázek 21 – Registr AMUX AD převodníku
Obrázek 22 – Registr ADCSRA AD převodníku
Obrázek 23 – Registry ADCH a ADCL pro ADLAR=0
Obrázek 24 – Registry ADCH a ADCL pro ADLAR=1
Obrázek 25 – Zapojení USBasp k ATmega8 [4]
Obrázek 26 – Programátor USBasp
Obrázek 27 – Zvolený přenos dat RS232
Obrázek 28 – Radiomodem RSX 150 [10]
Obrázek 29 – Schéma připojení radiomodemu RSX150 k PC [10]
Obrázek 30 – Radiomodem Racon RE400 a zapojení konektoru RS232 [11]
Obrázek 31 – Možnost nastavení RE400 [11]
Obrázek 32 – Bluetooth modul OEMSPA310
Obrázek 33 – Blokové zapojení ATmega8
Obrázek 34 – Časový průběh signálu pro servomotor
Obrázek 35 – Časový průběh signálu pro regulátor otáček
Obrázek 36 – Vývojový diagram pro vysílání dat přes FWI do SRF10 (vlevo) a vývojový diagram pro přijímání bitu vzdálenosti ze SRF10 (vpravo)
Obrázek 37 – Vývojový diagram příkladu komunikace CMPS03
Obrázek 38 – Ovládací program pro robota
Obrázek 39 – umístění snímače SRF10 pro měření
Obrázek 40 – Měření charakteristiky ultrazvukového dálkoměru SRF10
Obrázek 41 – Měření charakteristiky ultrazvukového dálkoměru SRF10
Obrázek 42 – Všechny předměty, které byly testovány při měření se SRF10
Obrázek 43 – Vyzařovací charakteristika snímače SRF10 (měřeno do 150cm)
Obrázek 44 – Měření charakteristiky CMPS03 a zkouška prostředí měření

Obrázek 45 – Měření charakteristiky ACC7260
Obrázek 46 – Hliníková konzole pro uchycení SRF10 a umístěné snímače tlumící pěnou
Obrázek 47 – Umístění komponentů na robotu
Obrázek 48 – Umístění komponentů na robotu - pohled zvrchu
Obrázek 49 – Umístění komponentů na robotu – pohled zprava
Obrázek 50 – Umístění komponentů na robotu – pohled zprava
Obrázek 51 – Zjednodušené schéma zapojení řídicí desky a komponentů
Obrázek 52 – Schéma zapojení podvozku
Obrázek 53 – Schéma zapojení
Obrázek 54 – Navržený plošný spoj
Obrázek 55 – Rozmístění součástek na plošném spoji
Obrázek 56 – Vyrobený a součástkami osazený plošný spoj
Obrázek 57 – Místa měření síly signálu komunikačních modulů
Obrázek 58 – Měření síly signálu – zobrazení na PC

10 SEZNAM TABULEK

- Tabulka 1 – Parametry podvozku
- Tabulka 2 – SRF10 registry [3]
- Tabulka 3 – SRF10 Příkazy pro měření [3]
- Tabulka 4 – SRF10 Analogové zesílení [3]
- Tabulka 5 – SRF10 Změna I2C adresy [3]
- Tabulka 6 – CMPS03 význam registrů [6]
- Tabulka 7 – Volba rozsahu ACC7260 [7]
- Tabulka 8 – význam bitů TCCR0 [1]
- Tabulka 9 – Stav vývodů [1]
- Tabulka 10 – Nastavení analogové reference AD převodník
- Tabulka 11 – Srovnání komunikačních modulů
- Tabulka 12 – Napěťové úrovně RS232 Datové a řídicí signály
- Tabulka 13 – Význam pinů na konektoru samce Cannon9 pro RS232
- Tabulka 14 – Využití piny na OEMSPA310
- Tabulka 15 – Příklad natočení kol a jejich hodnoty začátku pulsu
- Tabulka 16 – Příklad hodnot pro ovládání regulátoru otáček
- Tabulka 17 – Adresy ultrazvukových snímačů SRF10
- Tabulka 18 – Formáty zpráv pro ovládání robota
- Tabulka 19 – Formát zpráv pro získání naměřených dat
- Tabulka 20 – Data naměřená snímačem uloženým 10cm nad zemí
- Tabulka 21 – Data naměřená snímačem uloženým 20cm nad zemí (výška na robotu)
- Tabulka 22 – Data naměřená snímačem uloženým 50cm nad zemí
- Tabulka 23 – Data naměřená snímačem 100cm nad zemí
- Tabulka 24 – Data naměřená při různých velikostech detekovaného předmětu
- Tabulka 25 – Vyzařovací charakteristika snímače SRF10 (měřeno do 150cm)
- Tabulka 26 – Měření charakteristiky CMPS03 bez kalibrace
- Tabulka 27 – Měření charakteristiky CMPS03 po kalibraci
- Tabulka 28 – Charakteristika akcelerometru ACC7260
- Tabulka 29 – Seznam použitých součástek na plošném spoji
- Tabulka 30 – Měření komunikačních modulů v 2.NP budovy
- Tabulka 31 – Měření komunikačních modulů v různých NP